



Universidad  
Carlos III de Madrid

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

# **ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL HIELO**

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS Y TEORÍA DE  
ESTRUCTURAS

Grado en Ingeniería Mecánica

### **Autora:**

Mélanie Sánchez Tiemblo

### **Tutores:**

Jesús Pernas Sánchez

José Alfonso Artero Guerrero

Leganés, Octubre de 2016



# **ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL HIELO**

**Autora:** Mélanie Sánchez Tiemblo

**Tutores:** Jesús Pernas Sánchez y José Alfonso Artero Guerrero

Tribunal calificador:

Presidente: Jorge López Puente

Vocal: Raquel Lizarte Mayo

Secretario: Susana Sanz Sánchez

Calificación:

Leganés, Octubre de 2016



## *Agradecimientos*

*En primer lugar quería agradecer a mis tutores, Jesús Pernas Sánchez y José Alfonso Artero Guerrero, que desde el primer momento se han implicado en este trabajo para sacarlo adelante. Ellos han sabido guiarme, apoyarme y aconsejarme, dedicarme su tiempo en definitiva. Gracias por haberme aportado conocimientos y por haber despertado en mí una gran curiosidad en este campo de investigación.*

*También me gustaría agradecer a mi familia todo el apoyo que me ha dado, por haber estado ahí a lo largo de estos años de carrera pero sobre todo a lo largo de estos últimos meses, alentándome cada día para cruzar esta meta. Le doy las gracias especialmente a mi padre y a mi hermano, mis ejemplos a seguir por su esfuerzo y dedicación en sus respectivos trabajos y por aportarme unos principios y unos valores por los que estoy tremendamente orgullosa.*

*Dar las gracias a todos los compañeros y amigos que me han dado estos años de Grado, las risas, los agobios compartidos, las canciones motivadoras previas a entrar a los exámenes, las horas de biblioteca, las horas frente al ordenador haciendo prácticas y trabajos interminables en grupo, etc. Muchas gracias.*

*Y, por último, acordarme y hacer una mención especial a ella, la mujer de mi vida, mi madre, “ma maman”, quien se marchó hace ya doce años dejando un vacío que jamás nadie podrá ocupar. Mi aliento para seguir adelante, mi guía para escoger el mejor camino. Sueño con llegar a ser lo que ella fue, sueño con tener su valor y su coraje y llegar a alcanzar y cruzar todas las metas que me ponga la vida por aquella meta que ella no pudo cruzar. Je t’aime maman...*

*A mi familia,*

*À ma mère.*

# Resumen

Debido al progresivo deshielo de los polos, y más concretamente del océano Ártico, los grandes navíos comerciales están valorando la posibilidad de cambiar su trayectoria habitual por el Canal de Suez y utilizar en su lugar el paso del Noroeste para sus rutas, abaratando así sus viajes debido a una disminución de las millas náuticas recorridas para llegar a su destino.

Dado que el avance del deshielo es una incógnita difícil siquiera de predecir, resulta necesario saber cómo se comporta el hielo frente a posibles impactos de los buques a la hora de atravesar dicho paso para así despejar dudas acerca de la posibilidad de utilizar esta ruta, hasta hace unos años casi infranqueable por el gran volumen de hielo, que a día de hoy está en constante movimiento.

Para ello, este trabajo busca analizar experimentalmente el comportamiento dinámico del hielo. Los ensayos se realizarán en una torre de caída de peso empleando un percutor plano que impactará sobre los cilindros de hielo previamente fabricados, siendo estos de distintas alturas y mismo diámetro.

Se emplearán varias energías para posteriormente analizar el desplazamiento del hielo, la velocidad de propagación de las fisuras y la fuerza de impacto a partir de la aceleración. Para analizar los datos obtenidos de los ensayos se empleará una herramienta de análisis de vídeo para obtener información de las imágenes grabadas con una cámara de alta velocidad, y así representar los valores de fuerza frente al tiempo.

# Tabla de contenidos

Agradecimientos .....	V
Resumen .....	VII
Tabla de contenidos .....	VIII
Lista de figuras .....	X
Lista de tablas .....	XI
Introducción .....	1
1.1. Motivación .....	1
1.2. Objetivos .....	5
1.3. Contenido .....	6
Antecedentes .....	8
2.1. Introducción .....	8
2.2. Comportamiento mecánico del hielo .....	9
2.2.1. Estructura cristalina del hielo .....	9
2.2.2. Comportamiento mecánico del hielo .....	13
2.3. Modelos de comportamiento del hielo frente a impacto .....	16
2.3.1. Introducción .....	16
2.3.2. Tipos de hielo y sus procesos de fabricación .....	16
2.3.3. Ensayos de rápida compresión en hielo monocristalino .....	17
2.3.4. Resultados .....	18
Material y método experimental .....	20
3.1. Introducción .....	20
3.2. Fabricación bloques de hielo .....	21
3.2.1. Corte de los cilindros de hielo .....	21
3.2.2. Aislamiento del molde de congelación .....	22
3.2.3. Diseño e impresión de una base mediante Solid Edge .....	22
3.3. Dispositivos experimentales .....	24
3.3.1. Torre de caída de peso .....	24
3.3.2. Cámara de alta velocidad e iluminación LED .....	26
3.3.3. Acelerómetro .....	28
3.3.4. Trigger .....	29
3.3.5. Adquisición de datos .....	29
3.4. Procedimiento de ensayo .....	31



Resultados .....	32
4.1. Introducción .....	32
4.2. Exposición de los hielos ensayados.....	33
4.3. Análisis de impacto de percutor plano sobre probetas de hielo .....	36
4.3.1. Análisis de datos obtenidos por la adquisición de datos de la torre de caída de peso.....	36
4.3.2. Análisis de datos obtenidos mediante el programa Tracker de análisis de vídeo.....	38
4.3.3. Análisis de datos obtenidos por el sistema de adquisición acelerómetro-dewetron..	47
4.4. Comparación y discusión: Acelerómetro vs. Análisis de Vídeo con Tracker .....	49
4.5. Análisis de la fractura.....	54
Conclusiones y trabajos futuros .....	58
5.1. Introducción .....	58
5.2. Conclusiones .....	59
5.3. Trabajos futuros .....	59
Bibliografía .....	61
Anexo A .....	63
Anexo B .....	68
Anexo C .....	70

# Lista de figuras

Figura 1. Imagen captada por un dron en el Ártico. ....	2
Figura 2. Extensión del hielo del océano Ártico durante el periodo estival de las últimas décadas [1]. ....	3
Figura 3. Ruta por el Canal de Suez frente a paso del Noroeste. ....	4
Figura 4. Los 3 estados naturales del agua y sus microestructuras. ....	9
Figura 5. La forma hexagonal del hielo Ih. ....	10
Figura 6. Las diferentes estructuras cristalinas del hielo [11]. ....	11
Figura 7. Disposición tridimensional de las moléculas que forman la microestructura del hielo. ....	12
Figura 8. Probeta cilíndrica de hielo monocristalino. ....	17
Figura 9. Máquina hidráulica de ensayos. ....	18
Figura 10. Comparativa de los ensayos de fractura a compresión con la literatura de años anteriores. ....	18
Figura 11. Carga vs. Desplazamiento y fractura para una velocidad de deformación de 30s-1..	19
Figura 12. Cilindros de metacrilato para fabricar los especímenes de hielo. ....	22
Figura 13. Alzado, planta y vista isométrica de la pieza soporte. ....	23
Figura 14. Impresora 3D Witbox. ....	24
Figura 15. Esquema de la torre de caída de peso [16]. ....	25
Figura 16. Torre de caída de peso en el laboratorio. ....	26
Figura 17. Cámara de alta velocidad Photron SA-Z. ....	26
Figura 18. Secuencia de imágenes del impacto a 8J del hielo (vídeo 11). ....	27
Figura 19. Acelerómetro 352C33 PCB Piezotronics. ....	28
Figura 20. Dewetron DEWE-800. ....	29
Figura 21. Captura del marco Tracker para el hielo de masa 81,06 g. ....	30
Figura 22. Desplazamiento en el eje y del hielo de masa $m = 81,06$ g. ....	40
Figura 23. Velocidad en el eje y del hielo de masa $m = 81,06$ g. ....	40
Figura 24. Aceleración en el eje y del hielo de masa $m = 81,06$ g. ....	41
Figura 25. Energía absorbida por el hielo de masa $m = 81,06$ g ( $E=8J$ ). ....	42
Figura 26. Desplazamiento en el eje y de las probetas de altura $h = 42$ mm. ....	43
Figura 27. Desplazamiento en el eje y de las probetas de altura $h = 63$ mm. ....	44
Figura 28. Desplazamiento en el eje y de las probetas de altura $h = 84$ mm. ....	44
Figura 29. Desplazamiento en el eje y de las probetas ensayadas a 4J. ....	45
Figura 30. Gráfica de las variaciones de fuerza de impacto $F(t)$ del hielo de masa $m = 78,65$ g. ....	49
Figura 31. Gráfica comparativa de los espectros de fuerza de acelerómetro y Tracker para el hielo $m = 48,49$ g. ....	50
Figura 33. Dependencia de las fuerzas máximas con las energías de ensayo. ....	52
Figura 34. Dependencia de las fuerzas máximas con la altura de las probetas. ....	52
Figura 35. Evolución de la tensión de compresión frente a la velocidad de deformación. ....	54
Figura 36. Aparición de una fisura vertical en el espécimen de $m = 81,06$ kg tras el impacto. ...	55
Figura 37. Relación de la fuerza con las imágenes grabadas. ....	57
Figura 38. Diagrama Gantt. ....	69

# Lista de tablas

Tabla 1. Resumen de los ensayos a realizar. ....	33
Tabla 2. Valores de masa y altura y sus errores relativos. ....	35
Tabla 3. Condiciones iniciales de los ensayos. ....	38
Tabla 4. Desplazamiento real de cada una de las probetas.....	39
Tabla 5. Deformaciones y velocidades de deformación experimentadas por las probetas. ....	46
Tabla 6. Resumen de los tiempos de impacto de los ensayos. ....	48
Tabla 7. Valores máximos de fuerza de la comparativa acelerómetro-Tracker. ....	51
Tabla 8. Tensiones de compresión producidas por el impacto.....	53



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

Entre los distintos efectos que produce el cambio climático está el deshielo, hasta el momento parcial, del océano Ártico; un efecto con múltiples consecuencias geopolíticas.

Este fenómeno de deshielo se refiere a la disminución de la banquisa ártica y el deshielo de la capa que cubre la casi totalidad de Groenlandia. La banquisa o mar helado es una capa de hielo flotante que se forma en las regiones oceánicas polares; existen dos en nuestro planeta: la banquisa antártica y la banquisa ártica. Su espesor típico está entorno a un metro cuando se renueva cada año, por derretimiento y posterior congelación, y de cuatro o cinco metros cuando se mantiene en el tiempo. La causa principal de la aparición de la llamada banquisa es el congelamiento desde la superficie. Para que la solidificación comience se necesita una temperatura de  $-1,8^{\circ}\text{C}$  a causa del descenso crioscópico que es la disminución del punto congelación que acompaña a la salinidad del océano Ártico. En primer lugar se forman pequeños cristales de agua pura que finalmente se reúnen formando la banquisa de hielo de agua con presencia de salmuera en las grietas presentes por la unión de los cristales.

La banquisa ártica alcanza los 15 millones de km<sup>2</sup> en marzo y los 6,5 millones de km<sup>2</sup> en septiembre. Según estudios recientes, su área seguirá disminuyendo en el futuro, a pesar de no llegar a un consenso objetivo sobre cuánto avanzará la descongelación. Hasta la fecha, los análisis científicos no han detectado que el océano ártico se deshela estacionalmente durante los últimos setecientos mil años, a pesar de haber existido períodos más cálidos. Los crecientes estudios acerca de este fenómeno siguen buscando las causas y consecuencias del deshielo ártico (figura 1), como por ejemplo la alteración de la circulación atmosférica, el calentamiento del propio océano o la alteración de la corriente del golfo; ya que al reducirse la superficie de hielo, disminuye el efecto albedo que es el reflejo de la luz, por lo que se devuelve menos energía solar al espacio, fenómeno que a su vez acelera la reducción del hielo ártico; buscando también nuevos métodos para el cálculo óptimo del espesor del hielo [3].



Figura 1. Imagen captada por un dron en el Ártico.

En el verano de 2007, la banquisa alcanzó su mínima extensión hasta el momento conocida, sin embargo, durante el invierno de ese mismo año, la mayor parte de la banquisa derretida en verano, se congeló de nuevo y se acercó de nuevo a la extensión de años anteriores. Es importante destacar que en las zonas de hielo permanente, el espesor de la capa helada era más delgado que en el invierno anterior. Ya en la

primavera del 2008, la extensión de la banquisa fue la mayor de los últimos años, aunque el volumen de hielo, es decir el espesor de la capa helada, disminuyó a una velocidad sin precedentes según datos aportados por la NASA. Sin embargo, cuatro años más tarde, en 2012, la reducción de la banquisa ártica firmó un nuevo récord (figura 2), y en el mes de marzo del presente año 2016, se alcanzó la menor extensión en invierno desde que la NASA la monitoriza por satélite, 14,52 millones de kilómetros cuadrados [2].

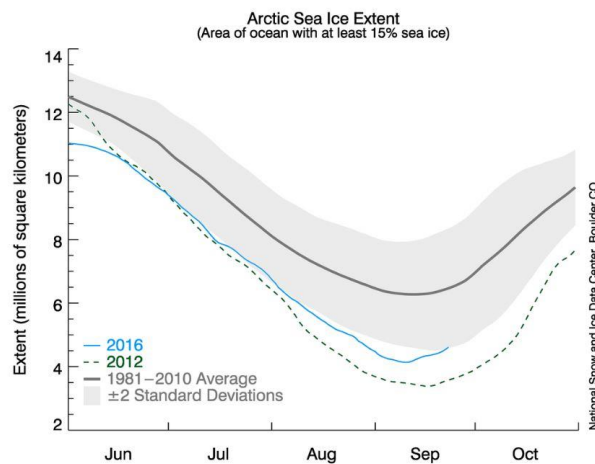


Figura 2. Extensión del hielo del océano Ártico durante el periodo estival de las últimas décadas [1].

Ahora que el calentamiento planetario ha hecho al Ártico más accesible que nunca, se ha desatado un nuevo frenesí por las rutas comerciales en esta zona. Además, estas aguas carecen de piratas lo que supone una ruta comercial mucho más segura.

La ruta marítima que bordea Norteamérica por el Norte atravesando el océano Ártico se conoce como el paso del Noroeste. Esta ruta conecta el estrecho de Davis y el estrecho de Bering, véase, el océano Atlántico Norte y el océano Pacífico. El hecho de que el deshielo de dicho océano progrese de forma continuada está haciendo que el Ártico sea parcialmente navegable, acortando las desmesuradas distancias que se recorren por la ruta comercial del canal de Suez por un paso septentrional mucho más corto entre por ejemplo los puertos de Tokio y Londres o Nueva York y Shanghái (figura 3).

En 2001, la marina estadounidense publicó un informe que advertía de que los barcos, tanto militares como mercantes, no estaban diseñados para las condiciones

árticas y que la cartografía, los sistemas de navegación y las redes logísticas del momento eran inadecuados para operar en el Norte.

Tanto el paso del Noroeste como el del Norte, controlado por Rusia, permiten ahorrar a las compañías navieras mucho tiempo y dinero ya que acortan considerablemente la distancia de los trayectos. Por ejemplo, si a través del canal de Suez la distancia que separa el puerto noroccidental ruso de Múrmansk y el puerto japonés de Yokohama equivale a doce mil millas náuticas, por la ruta marítima del Norte, por el Ártico, esta distancia se reduce a cinco mil setecientas millas.



Figura 3. Ruta por el Canal de Suez frente a paso del Noroeste.

Son numerosos los casos de buques y cargueros que durante la primera y segunda guerra mundial quedaron atrapados en el océano Ártico al tratar de cruzar el paso del Noroeste, quedando a menudo el casco del barco congelado debido a la falta de un revestimiento adecuado para combatir el frío polar. Por ello, hay que diseñar los barcos ante posibles impactos de hielo ártico, siendo necesario conocer el comportamiento del hielo al régimen de velocidad de los barcos que surcan éste paso. Para ello, el método experimental más utilizado es el ensayo de impacto en torre de caída de peso.



## **1.2. Objetivos**

El Trabajo Fin de Grado aquí presentado tiene como objetivo principal estudiar el comportamiento del hielo al ser impactado con diferentes energías y por lo tanto con diferentes fuerzas y velocidades de deformación.

Para entender este comportamiento, es necesario cumplir los siguientes objetivos:

- Determinar la geometría de los cilindros de hielo que se desean fabricar, diámetro y alturas, teniendo en cuenta el percutor utilizado en la torre, así como el espacio reservado para la zona de ensayo en la torre.
- Obtener cilindros de plástico duro con la geometría deseada para los bloques de hielo. Estos deben ser cortados con precisión.
- Pensar y diseñar un método efectivo para fabricar los bloques de hielo, véase, obtener una matriz de congelación adecuada para evitar la aparición de burbujas de aire en el hielo, lo cual podría alterar el comportamiento del hielo al ser ensayado implicando resultados poco fiables; el hielo debe ser lo más cristalino posible.
- Definir los procesos de congelación. Los cilindros disponibles pueden disponerse de manera diferente en la matriz de congelación.
- Definir los rangos de energía oportunos para ensayar los cilindros en la torre de caída de peso. Estos valores deben ser coherentes por lo que habrá que utilizar algunos bloques de hielo a modo de prueba para establecer un rango de energías.
- Poner a punto los sistemas de medición empleados en los ensayos (calibración, disposición, etc.), tales como: el sistema de iluminación, la cámara de vídeo de

alta velocidad, el trigger, el acelerómetro y los programas de adquisición de datos.

- Realizar ensayos de impacto en la torre de caída de peso variando la energía de los mismos, es decir la velocidad de impacto, así como las alturas de los bloques de hielo.
- Análisis de los resultados de impacto mediante una herramienta de análisis de vídeo que permita observar la fractura del hielo tras el impacto, su desplazamiento y la velocidad de la propagación de las fisuras, así como un lenguaje de programación para traducir los valores de fuerza a partir de la aceleración.
- Encontrar posibles relaciones entre las variables energía, altura y fuerza.

## **1.3. Contenido**

El trabajo consta de cinco capítulos a lo largo de los cuáles se busca estudiar y analizar experimentalmente el comportamiento dinámico del hielo.

En el presente capítulo se explican las razones que han motivado la realización de este trabajo fin de grado, así como los objetivos a cumplir para llevar a cabo el estudio y el contenido expuesto en el trabajo.

El segundo capítulo recoge una exposición del comportamiento mecánico del hielo en la que se explica la estructura cristalina del hielo y los diferentes tipos de esta que se pueden encontrar indicando cuáles son las más comunes y con cual se trabaja para el desarrollo de este trabajo. Además, se presentan las propiedades elásticas y resistentes del material empleado, en este caso el hielo, y su dependencia con variables como la temperatura, la velocidad de deformación y la microestructura. Por último, este capítulo expone un modelo de comportamiento del hielo frente a impacto, encontrado en la literatura, incluyendo los procesos de fabricación de los especímenes y los ensayos de rápida compresión en hielo monocristalino.

El tercer capítulo está destinado a la descripción del método experimental y a los materiales, diseño y proceso de fabricación; y dispositivos empleados para la realización del mismo, uso y calibración.

En el capítulo cuarto se exponen y discuten los resultados obtenidos del análisis de los ensayos mediante las herramientas utilizadas, lenguaje de programación y análisis de vídeo.

Finalmente, el quinto y último capítulo recoge las conclusiones que se extraen del desarrollo de este trabajo fin de grado y se proponen posibles trabajos futuros para complementar los resultados obtenidos en éste.

# Capítulo 2

## Antecedentes

### 2.1. Introducción

En este capítulo se presentan los diferentes tipos de hielo que se pueden encontrar y sus estructuras, indicando cuál se va a emplear en este trabajo para los ensayos por ser el más común de todos ellos. Además se estudia el comportamiento mecánico de este material en función de sus propiedades elásticas y resistentes y los factores de dependencia de las mismas.

Por último, se presenta un modelo de comportamiento del hielo frente a impacto, desde los procesos de fabricación de las probetas de hielo hasta los resultados obtenidos y su discusión.

## 2.2. Comportamiento mecánico del hielo

### 2.2.1. Estructura cristalina del hielo

El hielo representa uno de los tres estados naturales del agua, y conserva su estructura molecular: dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno unidos entre sí por enlaces covalentes fuertes. Esta conversión del agua de su estado líquido a su estado sólido se produce por un descenso suficiente de la temperatura. En el caso del agua pura sometida a una atmósfera de presión, a la altura del nivel del mar, la solidificación por congelación se produce a 0 °C.



Figura 4. Los 3 estados naturales del agua y sus microestructuras.

Al congelarse, el agua se expande, es decir que aumenta su volumen y por lo tanto disminuye su densidad. Este fenómeno impide que el océano Ártico, el que nos incumbe en este trabajo fin de grado, se congele en todo su volumen ya que el hielo flota sobre la superficie del agua, de mayor densidad que el hielo, quedando expuesto a los cambios de temperatura. La densidad típica del hielo a 0 °C es de 916,8 kg/m<sup>3</sup>.

El hielo presenta diferentes estructuras cristalinas, concretamente doce (figura 6). Y su aparición depende de las condiciones de temperatura y presión durante el proceso de congelación del agua.

Tipos de estructuras cristalinas del hielo:

- **Hielo Ih:** Todo el hielo que se forma en la biosfera terrestre es hielo del tipo Ih, a excepción de una pequeña cantidad de hielo Ic. Los cristales de hielo tienen forma hexagonal (figura 5).

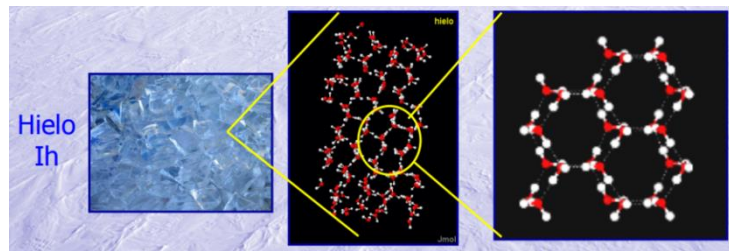


Figura 5. La forma hexagonal del hielo Ih.

- **Hielo Ic:** Se forma a baja temperatura, su microestructura es cúbica centrada en las caras, y tiene una densidad aproximada de  $900 \text{ kg/m}^3$ .
- **Hielo II:** Se obtiene a baja temperatura, cuenta con una microestructura ortorrómbica centrada y su densidad es aproximadamente de  $1200 \text{ kg/m}^3$ .
- **Hielo III:** Aparece a baja temperatura, tiene una estructura tetragonal y su densidad está alrededor de los  $1100 \text{ kg/m}^3$ .
- **Hielo V:** Se precisa alta presión y baja temperatura para que se forme esta microestructura monoclinica de base centrada y de densidad aproximada de  $1200 \text{ kg/m}^3$ .
- **Hielo VI:** Aparece bajo condiciones de alta presión y baja temperatura, su estructura es tetragonal y su densidad es aproximadamente  $1300 \text{ kg/m}^3$ .
- **Hielo VII:** Esta microestructura cúbica sencilla y densidad aproximada de  $1700 \text{ kg/m}^3$  se presenta a alta temperatura y alta presión.
- **Hielo VIII:** Se forma a alta presión y su estructura es tetragonal centrada, de densidad  $1600 \text{ kg/m}^3$ .
- **Hielo IX:** Se necesita una alta presión para dar lugar a esta microestructura tetragonal de densidad aproximada  $1200 \text{ kg/m}^3$ .
- **Hielo XII:** También de microestructura tetragonal, este hielo se forma alta presión y baja temperatura, y cuenta con una densidad de  $1300 \text{ kg/m}^3$ .

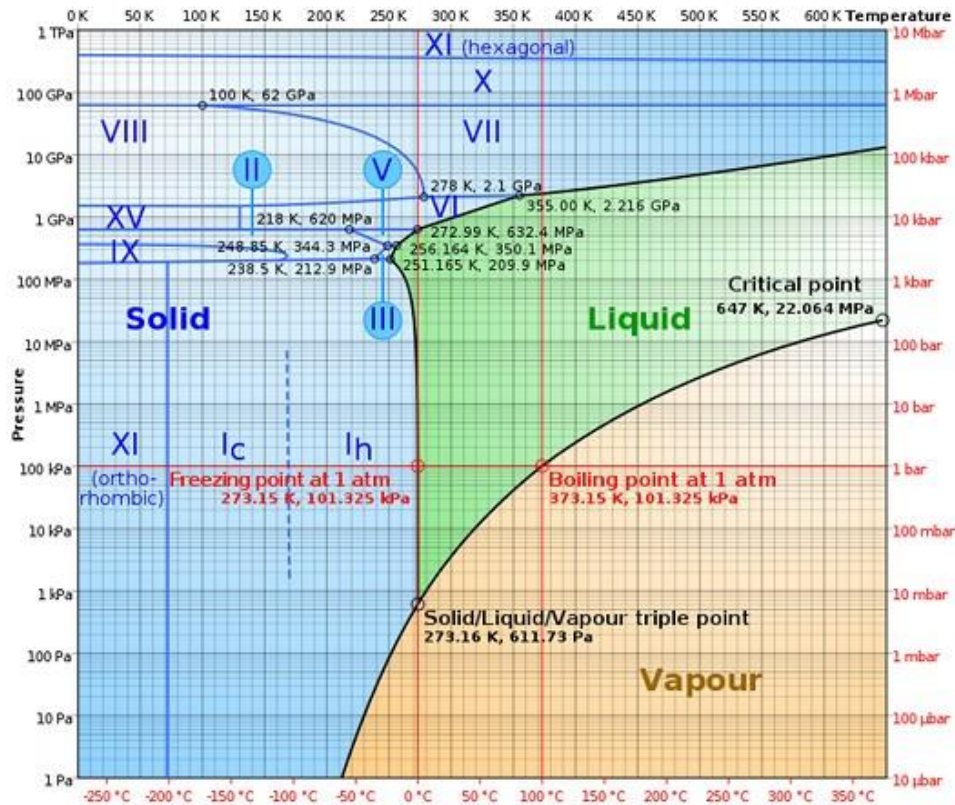


Figura 6. Las diferentes estructuras cristalinas del hielo [11].

A la presión atmosférica, la fase estable del hielo es la fase I. Esta puede ser de dos formas: hielo hexagonal Ih o hielo cúbico Ic, siendo la primera fase la más común.

Los cristales de hielo Ih tienen una base hexagonal conforme con su estructura en la que cada átomo de oxígeno de una molécula de agua tiene otros cuatro átomos de hidrógeno situados en los vértices de un tetraedro regular cuyo centro es el átomo de oxígeno de interés. La unión entre átomos intramoleculares es de enlaces covalentes simples y por tanto muy estables, mientras que la unión intermolecular se hace mediante enlaces de puente de hidrógeno relativamente débiles, de ahí la baja temperatura de fusión del hielo.

Esta estructura está formada por planos apilados (figura 7) con una relación de aspecto  $c/a = 1,629$  siendo  $a = 0,452$  nm el lado hexagonal y  $c = 0,737$  nm la altura del prisma hexagonal.

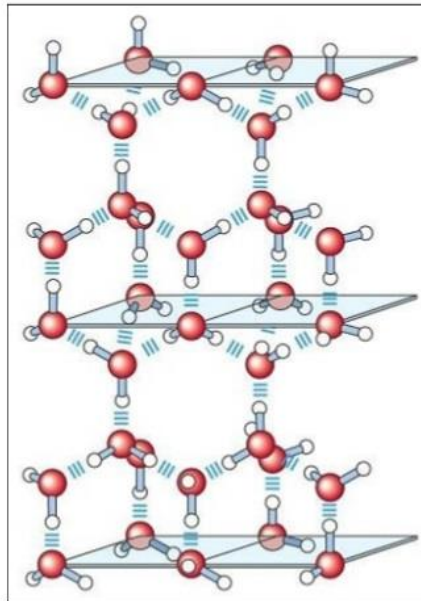


Figura 7. Disposición tridimensional de las moléculas que forman la microestructura del hielo.

Al agruparse, los cristales hexagonales forman granos policristalinos, que en su conjunto conforman el denominado hielo. Estos granos pueden tener diferentes tamaños y/o agrupaciones que dependen del proceso de congelación del agua [4, 6]. Así pues, el hielo puede tener múltiples microestructuras, siendo dos de ellas las más habituales: la microestructura granular y la microestructura columnar.

- Hielo granular: su comportamiento es isótropo, es decir, igual en todas las direcciones. Esto se debe a las múltiples orientaciones posibles de sus granos y la estructura interna de estos.
- Hielo columnar: en esta microestructura, la orientación de los granos en la estructura hexagonal determinará el comportamiento del hielo. En función de esta orientación, el hielo columnar se clasifica en:
  - ❖ Hielo-S1: los granos están orientados en paralelo al plano cristalográfico representado por la altura del prisma hexagonal.
  - ❖ Hielo-S2: los granos están orientados en perpendicular al plano cristalográfico representado por la altura del prisma hexagonal.
  - ❖ Hielo-S3: en su crecimiento, los granos no siguen ninguna dirección predominante, lo hacen de forma aleatoria. Esta microestructura es la



más común ya que para obtener Hielo-S1 y Hielo-S2 se necesitan unas condiciones de congelación muy concretas [4].

Por ello, el hielo de estudio se considerará isótropo, excluyendo del análisis el efecto de la estructura cristalina y su orientación [8].

### **2.2.2. Comportamiento mecánico del hielo**

Para entender el comportamiento mecánico del hielo se definen sus propiedades elásticas y resistentes.

#### **Propiedades elásticas del hielo:**

La expresión general del módulo de Young del hielo es:

$$E = E_m + c(T_m - T)$$

Siendo,

$E_m$  el módulo de Young de la microestructura presente en el hielo,

$T_m$  la temperatura de fusión del hielo bajo presión atmosférica [15],

$c$  el calor específico del hielo (depende de la microestructura)

$T$  la temperatura del hielo

Anteriormente se han descrito dos microestructuras diferentes que resultan ser las más comunes: el hielo granular y el hielo columnar. Por lo tanto, habrá una expresión diferente para cada una de ellas debido a diferentes valores de  $E_m$  y de  $c$ .

- Hielo granular:

$$E = E_m + c(T_m - T)$$

Donde,

$$\left\{ \begin{array}{l} E_m = 8,93 \text{ GPa} \\ c = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ GPa} \cdot \text{K}^{-1} \end{array} \right.$$

- Hielo columnar:

$$E = E_m + c(T_m - T)$$

Donde,

$$\left\{ \begin{array}{l} E_m = 9,61 \text{ GPa} \\ c = 1,1 \cdot 10^{-2} \text{ GPa} \cdot \text{K}^{-1} \end{array} \right.$$

### Propiedades resistentes del hielo:

Las propiedades resistentes del hielo presentan un comportamiento diferente a tracción y a compresión [9], por lo que los parámetros para obtener la resistencia a tracción  $\sigma_T$  y la resistencia a compresión  $\sigma_C$  toman valores diferentes.

Sin embargo, la tracción y la compresión dependen de los mismos factores:

- i. Velocidad de deformación:

Sometido a compresión y a bajas velocidades de deformación el hielo se comporta como un material dúctil. Se producen microfisuras que deslizan y logran volver a congelarse debido a la baja temperatura. Sin embargo, a altas velocidades de deformación, el hielo se asemeja a un material frágil. A medida que aumenta la velocidad de deformación del material, la re-congelación de las microfisuras se dificulta hasta ser imposible y se produce la rotura frágil. Este cambio de comportamiento del

hielo entre dúctil y frágil tiene lugar a una velocidad de deformación comprendida entre  $10^{-4}s^{-1}$  y  $10^{-3}s^{-1}$ , denominada velocidad de deformación de transición, la cual varía en función del tamaño de grano y de la temperatura [6]. El valor de resistencia a compresión aumenta conforme aumenta la velocidad de deformación, alcanzándose valores de 20 – 24 MPa a velocidades de deformación del orden de  $10^{-3}s^{-1}$  [12, 13, 14].

A tracción, el hielo se comporta como un material frágil y no depende de la velocidad de deformación [12]. El valor de la resistencia a tracción es de  $\sigma_T = 1,72 \text{ MPa}$ .

ii. Temperatura:

Según datos obtenidos mediante los ensayos realizados por Jones, Kim & Keuze y Shazyl et al., se observa que a medida que disminuye la temperatura aumenta la resistencia a compresión  $\sigma_C$  del hielo. Como ocurre con la velocidad de deformación, la temperatura no influye en el valor de resistencia a tracción [9, 14].

iii. Microestructura:

Como para el caso anterior en el que se discutía la dependencia de la temperatura en las resistencias a tracción y compresión del hielo, para el caso de la dependencia de la microestructura también se obtienen conclusiones obtenidas de los ensayos realizados por Cole [4], Hooke [5] et al. y más tarde por Schulson [6] que compararon diferentes microestructuras y tamaños de granos llegando a concluir que la resistencia a compresión del hielo disminuye a medida que aumenta el tamaño de grano debido a que la rotura se produce a través de las fisuras intra-granulares. De nuevo, la resistencia a tracción no depende de este factor de estudio.

De las tres variables estudiadas, la velocidad de deformación y la temperatura son las que más afectan al valor de la resistencia a compresión.

## **2.3. Modelos de comportamiento del hielo frente a impacto**

### *Estudio experimental de impactos a alta velocidad y fractura del hielo*

#### **2.3.1. Introducción**

El impacto de hielo en estructuras es un fenómeno que puede darse en varios campos. En este trabajo, se estudian sus aplicaciones navales, lo que está asociado con moderadas velocidades de impacto y hielo común.

Las referencias sobre el comportamiento del hielo en estudios geológicos y ambientales son abundantes (Jordaan, 2001) [17]. Se puede encontrar una tesis muy interesante en Schulson & Duval (2009), trabajo en el cual la caracterización está asociada con muy bajas velocidades de deformación [18]. Sin embargo, para altas velocidades de deformación la bibliografía es escasa, aunque se encuentran resultados interesantes del comportamiento tensión-deformación en los trabajos de Schulson et al. (2005) [19], Schulson et Iliescu (2005) [20], Shazly et al. (2006, 2009) [14], Jones (1997) [12], Dutta et al. (2004) [21] y Fasanella et al. (2006) [22]; trabajos llevados a cabo mediante ensayos de probetas de hielo de diferentes geometrías y hielos monocristalinos, granulares o columnares, empleando sistemas de carga como la barra Hopkinson.

En octubre de 2011 surge un nuevo estudio experimental de impacto a alta velocidad y fractura del hielo en el volumen 48 del *International Journal of Solids and Structures* que busca aportar nueva información acerca de la fractura por esfuerzo de compresión dinámica utilizando una cámara de alta velocidad que permite observar los tipos de fractura durante los ensayos de las probetas.

#### **2.3.2. Tipos de hielo y sus procesos de fabricación**

En el estudio de A. Combescure et al. [7] se ponen a prueba dos tipos de hielo: el monocristalino y el policristalino. El hielo común es generalmente del segundo tipo y

consiste en un conjunto de granos monocristalinos cuyo tamaño está comprendido entre 1 y 50 mm. Dentro del hielo policristalino se encuentran dos categorías de hielo, el hielo granular y el hielo columnar, explicados en apartados anteriores.

Para la fabricación de las probetas de hielo se utilizó agua desmineralizada y desoxigenada. El hielo granular (policristalino) se obtuvo congelando una mezcla de agua y hielo picado a  $-15^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas, mientras que el hielo monocristalino se consiguió congelando un contenedor de agua muy lentamente. El crecimiento del hielo era de 1 cm diario, añadiendo agua cada día hasta lograr el espesor deseado. Los bloques de hielo fueron cortados en forma cilíndrica (figura 8). La calidad de las probetas se comprobó visualizando la transparencia conseguida en el hielo, desechando el hielo que presentaba burbujas de aire.



Figura 8. Probeta cilíndrica de hielo monocristalino.

### ***2.3.3. Ensayos de rápida compresión en hielo monocristalino***

Los ensayos se realizaron mediante una máquina que imponía un máximo de 50 kN de carga dinámica (figura 9). La velocidad máxima fue próxima a  $10\text{ ms}^{-1}$  y el desplazamiento máximo de 250 mm. Los ensayos fueron grabados con una cámara de alta velocidad con una resolución óptima e iluminados con luz fría para obtener vídeos sobre los que poder visualizar la fractura sufrida por el hielo. Las cargas se midieron mediante un calibre piezoeléctrico, o un acelerómetro, con una frecuencia propia de 10

kHz. En cuanto a los desplazamientos, fueron medidos con un extensómetro óptico que permitía una velocidad máxima de  $1800 \text{ ms}^{-1}$  sobre 20 mm de desplazamiento con una resolución de  $2 \text{ }\mu\text{m}$ .



Figura 9. Máquina hidráulica de ensayos.

### **2.3.4. Resultados**

Las fuerzas de compresión obtenidas en estos ensayos se compararon con los resultados obtenidos por Schulson et al. (2005) [19, 20] y por Shazly et al. (2006) [14].

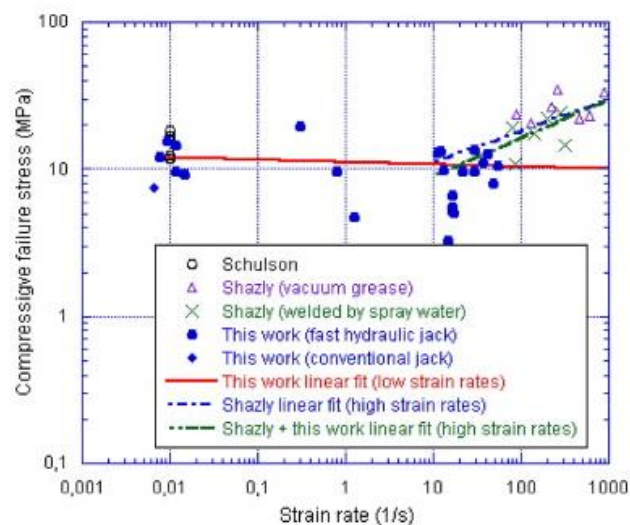


Figura 10. Comparativa de los ensayos de fractura a compresión con la literatura de años anteriores.

La velocidad de deformación máxima obtenida en este ensayo fue de  $50 \text{ s}^{-1}$ , siendo insignificante sobre la fuerza de compresión del material a estos niveles. Este valor está en concordancia con los obtenidos por los ensayos de 2005 y 2006 con los que se realizó la comparativa.

Como se puede observar, la dispersión de los resultados es significativa (figura 10), sin embargo esto es habitual en estudios de fractura de cilindros sometidos a compresión, para los cuales es difícil lograr una monitorización perfecta de las condiciones de contorno.

Por último, en la visualización de los vídeos grabados con la cámara de alta velocidad se observa que se obtiene la misma fractura en todas las probetas ensayadas: en primer lugar aparecen grietas verticales y longitudinales de rotura, seguidas de la explosión de la probeta en un gran número de pequeños trozos (figura 11). Esta observación concuerda con los ensayos de Schulson et al. y de Shazly et al. para pequeñas o medias velocidades de deformación.

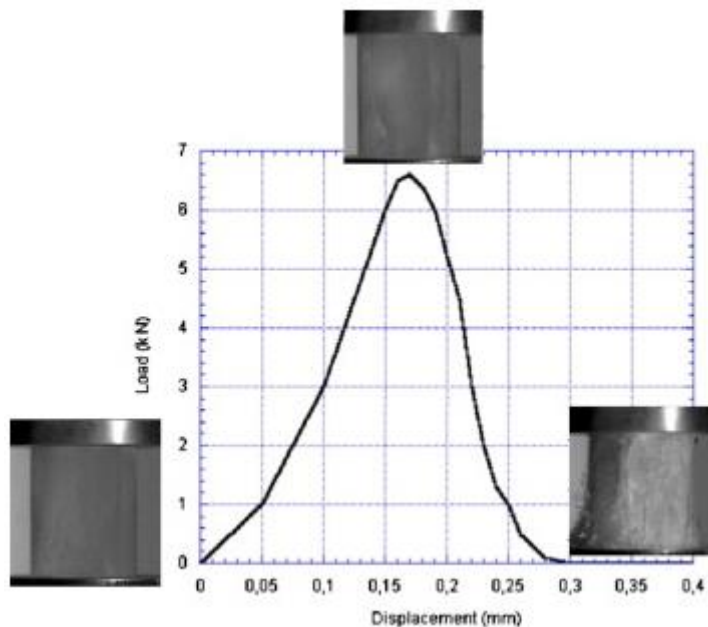


Figura 11. Carga vs. Desplazamiento y fractura para una velocidad de deformación de  $30 \text{ s}^{-1}$ .

# Capítulo 3

## Material y método experimental

### 3.1. Introducción

El capítulo 3 contiene el desarrollo de la parte experimental del Trabajo Fin de Grado. Se explica el procedimiento seguido para la fabricación de los bloques de hielo con forma cilíndrica, se presenta el utillaje empleado en los ensayos, tanto la torre de caída de peso destinada a realizar los impactos sobre el hielo, como los sistemas de adquisición de datos sobre los que obtener resultados para su posterior discusión en el siguiente capítulo de este trabajo. Los ensayos se han realizado en el laboratorio que tiene a su disposición el Departamento de Medios Continuos y Teoría de Estructuras en el campus de Leganés de la Universidad Carlos III de Madrid.



## **3.2. Fabricación bloques de hielo**

La fabricación de los bloques de hielo es una tarea compleja ya que debido a la diferencia de densidad entre la fase líquida del agua y la fase sólida, se crean tensiones que fisuran el hielo durante la expansión que experimenta en la fase de congelación en el molde.

Dado que la capacidad de aire que es capaz de disolver el hielo es menor que la del agua, pueden quedar burbujas ocluidas en los bloques de hielo, interrumpiendo la cristalinidad del mismo. Para evitar esto, la congelación debe ser preferentemente direccional, así se impide la presencia de burbujas de aire en los especímenes fabricados ya que estas se agrupan favoreciendo su eliminación [8].

El hielo se congela con forma cilíndrica mediante moldes con esta forma, que se encuentran a su vez incluidos en una matriz rectangular con una base mallada para permitir que el agua fluya permitiendo la eliminación de las burbujas de aire.

### ***3.2.1. Corte de los cilindros de hielo***

Se ha elegido una forma cilíndrica para los bloques de hielo, de este modo se evitan las aristas vivas que podrían tener bloques de hielo de forma cuadrada o rectangular por ejemplo. Esto evita pérdidas de material notables a la hora de desmoldar el hielo, pero resulta importante aclarar que la elección de la geometría no es una cuestión de esfuerzos ya que el hielo se somete únicamente a compresión, por lo que se obtendría el mismo resultado con bloques de hielo rectangulares o cuadrados. Además, el percutor empleado en los ensayos es de base circular lo que acompaña a emplear una geometría de las mismas características en el hielo.

Los cilindros utilizados como molde para congelar el hielo con la forma deseada se han obtenido a partir de un tubo de metacrilato de varios metros sobre el que se han realizado cortes a diferentes alturas para obtener cilindros de varios tamaños aunque de mismo diámetro (figura 12). Se ha empleado este plástico por sus idóneas propiedades para el uso requerido; en efecto cuenta con una transparencia de alrededor del 93%, el más transparente de los plásticos, lo cual permite saber si hay presencia de burbujas de aire en el hielo o alguna fisura o irregularidad en el mismo incluso antes de desmoldar.

Además, es resistente al impacto lo cual resulta de gran interés teniendo en cuenta que todos los cilindros se congelan juntos en un molde de mayores dimensiones y cubierto de agua por completo para evitar la presencia de aire en los bloques de hielo, lo que supone la necesidad del uso de herramientas como el martillo para romper el hielo sobrante, todo ello sin romper los moldes cilíndricos.



Figura 12. Cilindros de metacrilato para fabricar los especímenes de hielo.

### ***3.2.2. Aislamiento del molde de congelación***

Es importante que los bloques de hielo obtenidos no tengan burbujas de aire ya que la evolución de las fisuras al impactar el hielo se aprecia mejor si este es totalmente cristalino. Esto se consigue en gran medida aislando el molde sobre el que se introducen los cilindros de plástico. Para ello se ha empleado espuma bifásica de poliuretano con un volumen aproximado de 25 veces el volumen de los componentes mezclados en estado líquido. Es un excelente aislante térmico debido a la baja conductividad del gas ocluido en la espuma.

### ***3.2.3. Diseño e impresión de una base mediante Solid Edge***

Para completar la función del aislante e impedir la oclusión de burbujas de aire en los bloques de hielo hay que elevar los cilindros, que darán lugar al hielo para los ensayos, de la base del molde, de este modo el agua puede fluir por debajo dejando escapar el aire. Como base se ha utilizado una rejilla (figura 13) diseñada con las

dimensiones correctas para ponerla al fondo del molde; utilizando para ello el programa parametrizado Solid Edge de diseño asistido por ordenador (CAD) de piezas tridimensionales. Permite el modelado de piezas de distintos materiales, doblado de chapas, ensamblaje de conjuntos, soldadura, funciones de dibujo en plano para ingenieros. Para este diseño se ha utilizado únicamente el entorno pieza (.par) generando un sólido mediante protusión de material y posteriores vaciados para dar a la pieza el carácter de rejilla deseado. Todas las operaciones en 3D se generan a partir de perfiles 2D realizados sobre los planos de trabajo más adecuados para cada tarea.

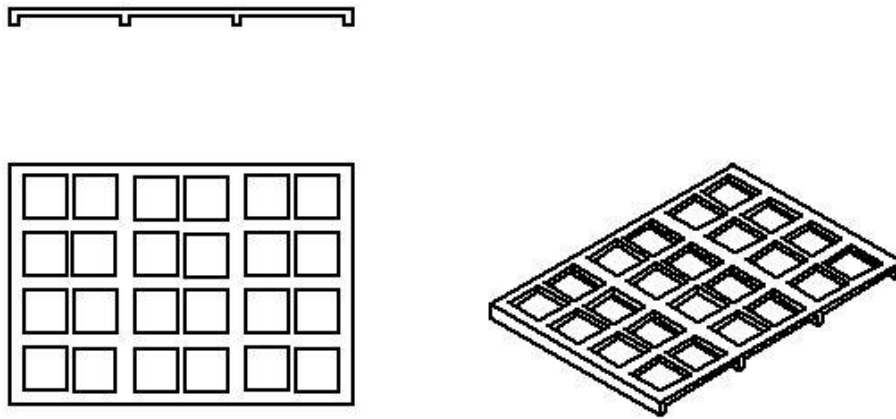


Figura 13. Alzado, planta y vista isométrica de la pieza soporte.

Para la impresión en 3D, la pieza diseñada se guarda en formato .stl. Este archivo define la geometría de la pieza excluyendo información como color, texturas o propiedades físicas que sí están incluidas en otros formatos CAD; es el formato estándar para las tecnologías de fabricación aditivas. El modelo STL tiene que ser convertido en instrucciones de impresión para la impresora 3D, se obtiene así el fichero .gcode. Se generan las trayectorias y capas de impresión y se calcula la cantidad de material a extruir. Además, este fichero contiene información acerca de la temperatura, la velocidad de extrusión y el control del espesor de pared. Gcode representa el lenguaje de programación más utilizado en Control Numérico (CNC).

La impresora Witbox empleada (figura 14) utiliza el método denominado Fabricación de Filamento Fundido (FFF), y se configura mediante el software CURA

que permite tomar decisiones sobre el aspecto y la calidad de la pieza en 3D, configurar el laminado y visualizar la pieza por capas.



Figura 14. Impresora 3D Witbox.

### **3.3. Dispositivos experimentales**

Los ensayos se han realizado para estudiar la fuerza ejercida por el impacto sobre el hielo y el comportamiento de este material frente al mismo. Para ello se ha hecho uso de la torre de caída de peso cuyo impactador en este caso es un percutor plano que asegura el contacto total con la superficie libre de las probetas al impactar. Además, se ha empleado una cámara de alta velocidad para grabar el ensayo y relacionar las imágenes con los datos proporcionados por la señal que registra el acelerómetro instalado en la torre. A continuación se presentan con más detalle los equipos utilizados en los ensayos.

#### ***3.3.1. Torre de caída de peso***

Para realizar los ensayos se emplea una torre de caída de peso instrumentada de la marca CEAST Fractovist, modelo 6785 (figuras 15 y 16). Ésta está acompañada de un sistema de adquisición de datos DAS 4000 que permite registrar hasta 4000 datos con un tiempo mínimo de muestreo de 1  $\mu$ s.

Dos cámaras componen la torre de caída de peso:

- Una cámara superior que consta de un percutor intercambiable que se desplaza verticalmente. La altura de caída libre máxima que proporciona la máquina es de 1m, aunque cuenta con un sistema de muelles que permite simular caídas de hasta 10m de altura. Para este trabajo, el percutor utilizado será plano para que el impacto se haga de forma homogénea sobre toda la superficie libre del bloque de hielo cilíndrico. El percutor tiene un diámetro de 60mm, siendo este mayor que el diámetro de los hielos ensayos, de tan sólo 42 mm de diámetro. Además, no será necesario hacer uso de los muelles.

Además, un equipo anti-rebote controlado por un sistema neumático detiene el percutor tras el primer impacto con la probeta ensayada; la energía residual es absorbida por otros dispositivos presentes en la torre [10].

- Una cámara inferior en la que se encuentra la base sobre la que se coloca la probeta a ensayar. Más concretamente, sobre esta base se instala un útil a modo de soporte sobre el que se instala el bloque de hielo.

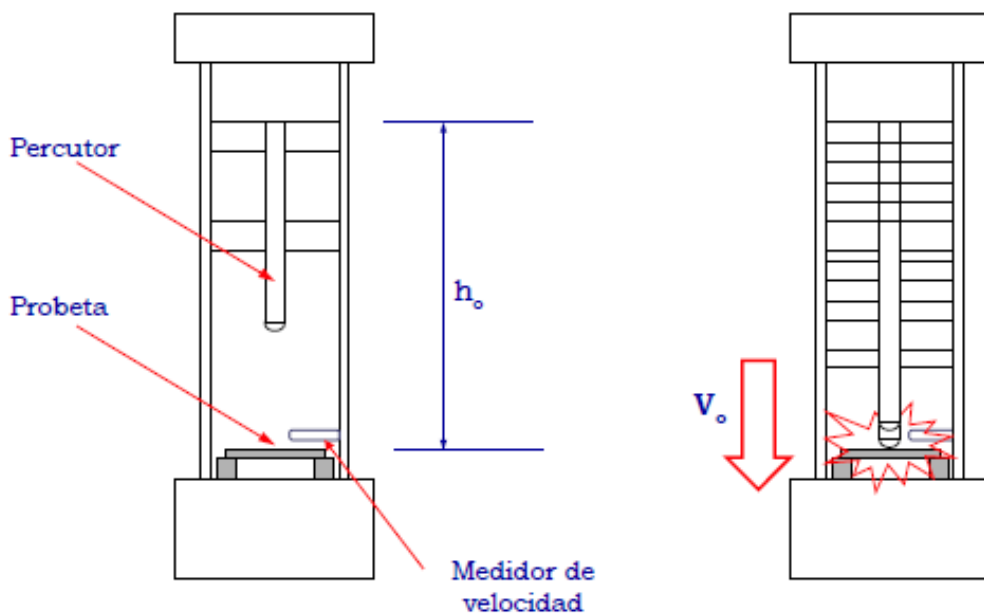


Figura 15. Esquema de la torre de caída de peso [16].

El percutor está instrumentado con bandas extensiométricas de modo que, a través del sistema de adquisición de datos de la torre, se obtiene la fuerza de contacto entre percutor y probeta frente al tiempo.



Figura 16. Torre de caída de peso en el laboratorio.

### ***3.3.2. Cámara de alta velocidad e iluminación LED***

Para poder visualizar el desplazamiento del percutor y de la probeta durante el impacto, así como observar las fisuras que se producen cuando el bloque fractura (figura 18), se emplea una cámara de alta velocidad Photron modelo FASTCAM SA-Z 2100K-M-32GB capaz de tomar 100.000 fps (figura 17). Para los ensayos realizados en este trabajo fin de grado se ha configurado la cámara con una resolución de 384 x 400 píxeles.



Figura 17. Cámara de alta velocidad Photron SA-Z.

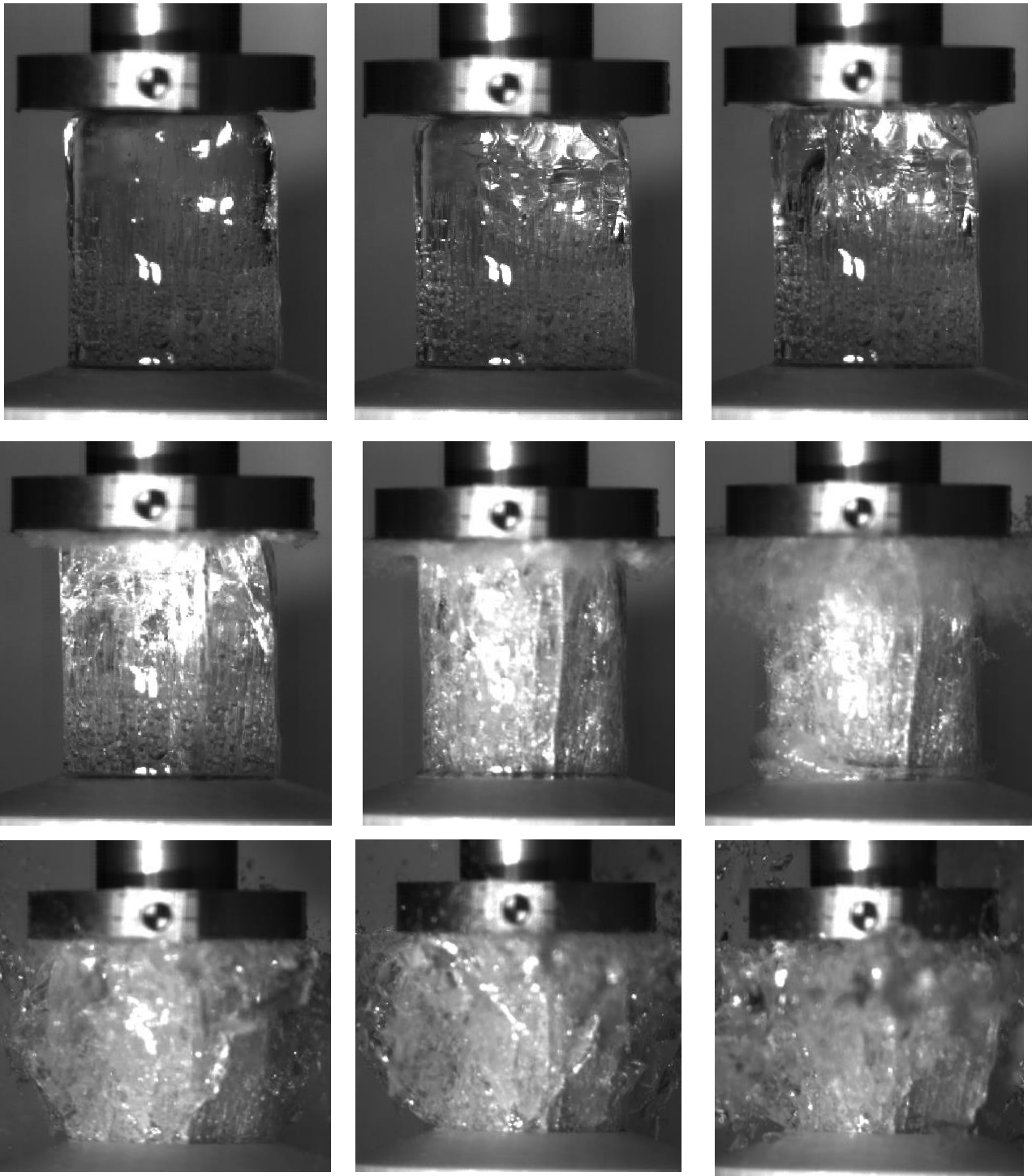


Figura 18. Secuencia de imágenes del impacto a 8J del hielo (vídeo 11).

Por otro lado, se ha empleado una iluminación mediante LED ya que este tipo de luz no calienta lo cual es deseable teniendo en cuenta que se trabaja con pequeños bloques de hielo que podrían fundir rápidamente bajo la luz de un foco.



### **3.3.3. Acelerómetro**

Dado que los elementos de la torre de caída de peso, véase las bandas extensiométricas, son muy sensibles al ruido (registran señales que no se deben al impacto del percutor de la probeta), se ha hecho uso de un acelerómetro piezoeléctrico por compresión. En su interior posee un retículo cristalino que al comprimirse produce una carga eléctrica proporcional a la fuerza aplicada, dicho de otro modo, cuando el acelerómetro es sometido a vibración, el disco piezoeléctrico de su interior se ve sometido a una fuerza variable proporcional a la aceleración de la masa.

Este dispositivo produce una carga en picoculombios por lo que es necesario un amplificador conversor que pase la unidad de carga a unidad de voltaje: voltios. El uso del acelerómetro permite obtener medidas de velocidad y desplazamiento así como determinar formas de onda y frecuencia.

El acelerómetro empleado en este Trabajo Fin de Grado (figura 19) es el modelo 352C33 de la serie 46643 de PCB Piezotronics. Abarca un rango de 0,5 a 10000 Hz y tiene una sensibilidad de 100,7 mV/g (10,27 mV/ms<sup>-2</sup>).



Figura 19. Acelerómetro 352C33 PCB Piezotronics.



### **3.3.4. Trigger**

Su empleo permite sincronizar las medidas tomadas por el ordenador y la cámara de alta velocidad. Este elemento es un disparador que se activa manualmente al presionarlo y permite recoger la señal del impacto.

### **3.3.5. Adquisición de datos**

El acelerómetro está conectado a un equipo de adquisición de datos que registra señales de alta frecuencia. En este caso, el dispositivo empleado es un Dewetron DEWE-800 (figura 20) que almacena datos cada 1  $\mu$ s; sincronizando acelerómetro y cámara mediante el Trigger como se ha explicado anteriormente.



Figura 20. Dewetron DEWE-800.

Por otro lado, se ha empleado un programa de análisis de vídeo de Java Open Source Physics (OSP) llamado Tracker que permite hacer un seguimiento de una masa o partícula y conocer su posición, velocidad y aceleración, entre otros, en cada instante de tiempo. Esta herramienta presenta los datos en tablas y gráficos y permite guardarlos sin necesidad de exportarlos a una hoja de cálculo. Además es posible parar el vídeo en cada frame, si se precisa, para visualizar por ejemplo el momento justo de impacto, tal y como ocurre en este trabajo.

Al lanzar el programa, se abre un vídeo .avi o .mov y antes de comenzar el análisis es imprescindible insertar un eje de coordenadas así como una vara de

calibración para tener una medida de referencia (figura 21). Esto permite obtener los valores reales de la posición que toma el cuerpo que se estudia a lo largo del ensayo. En este caso, el centro del eje elegido es también el centro de la marca hecha sobre el percutor. En cuanto a la vara de calibración se han utilizado dos, ya que no siempre la nitidez del vídeo permitía utilizar la misma; como primera vara se ha utilizado una distancia de 5 mm entre dos marcas del percutor, la otra calibración empleada ha sido el grosor del percutor plano, de 10 mm. Estas medidas se ponen en sistema internacional, en metros, para tener en esta unidad el desplazamiento, la velocidad y la aceleración, necesarias para el posterior análisis de la fuerza de impacto del percutor.

Una vez tomadas las referencias, se crea una masa puntual, en este caso, la marca central del percutor y se hace un seguimiento de la misma mediante los comandos del programa. A medida que avanza el vídeo, Tracker busca esta marca para seguirla e indicar su posición en cada instante.

Una vez concluida la búsqueda, se eligen los datos que se quieren visualizar. En este caso, se desea conocer el desplazamiento, la velocidad y la aceleración de la probeta, esta última será necesaria para obtener los valores de fuerza en la dirección de impacto.

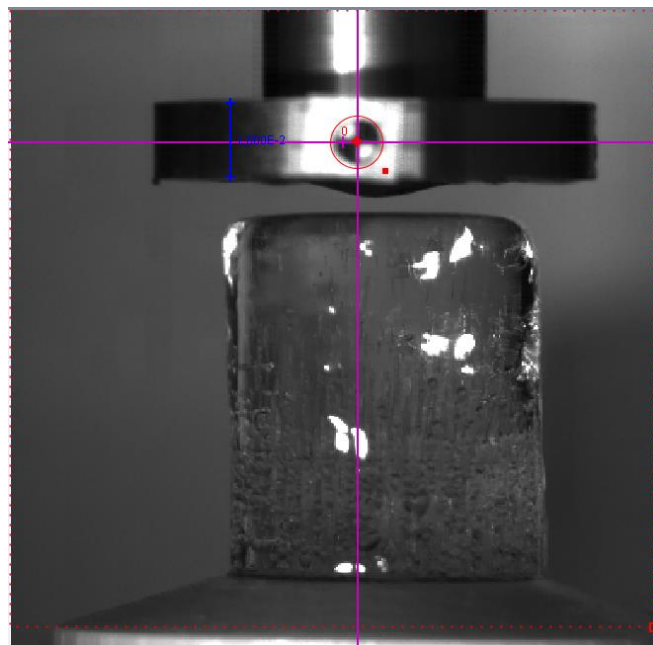


Figura 21. Captura del marco Tracker para el hielo de masa 81,06 g.

### **3.4. Procedimiento de ensayo**

Se han ensayado varios tipos de bloques de hielo, variando sus alturas, el proceso de congelación y la energía de impacto.

- i. Según el proceso de congelación:
  - Disposición vertical del molde cilíndrico
  - Disposición horizontal del molde cilíndrico
  
- ii. Según la altura del cilindro:
  - 42 mm
  - 63 mm
  - 84 mm
  
- iii. Según la energía de impacto:
  - 2J
  - 4J
  - 8J

Tras desmoldar los hielos a ensayar, estos se miden y pesan para tener medidas correctas y discutibles. Tras esto, se posiciona el hielo en el útil de la torre reservado para ello, se fija el parámetro de energía de impacto en el ordenador conectado a la torre y sus sensores de medida. Se enciende el equipo de iluminación y se prepara el sistema de adquisición de datos, entonces se realiza el impacto pulsando el trigger en el momento preciso para sincronizar cámara, que ya se encontraba lista para grabar, y el acelerómetro. El ordenador muestra la señal a analizar.

# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1. Introducción

Se han recogido datos mediante tres dispositivos: el sistema de adquisición de datos de la torre de caída de peso, el acelerómetro cuyos datos recoge y procesa el Dewetron y por último la cámara de vídeo Photron SA-Z que permite un análisis visual.

Los valores numéricos se han procesado mediante el lenguaje de programación Python 2.7, empleando el editor Spyder. Por otro lado, los vídeos se han analizado mediante el programa Tracker.

## 4.2. Exposición de los hielos ensayados

	ENERGÍA		
	2J	4J	8J
<b>ALTURAS</b>			
<i>Probeta</i> <i>h = 42 mm</i>	m = 51,35 g	m = 54,38 g	m = 48,49 g
	m = 51,47 g	m = 49,18 g	
<i>Probeta</i> <i>h = 63 mm</i>	m = 78,65 g	m = 76,27 g	m = 81,06 g
	m = 81,04 g	m = 82,2 g	
<i>Probeta</i> <i>h = 84 mm</i>		m = 109,23 g	m = 110,9 g
		m = 109,11 g	

Tabla 1. Resumen de los ensayos a realizar.

Para la realización de los ensayos, se han escogido tres alturas de probeta diferentes (tabla1). El objetivo de esto es analizar y corroborar la relación existente de esta variable con la velocidad de deformación: a mayor altura de probeta, menor velocidad de deformación.

Para poder validar los valores de las masas antes de realizar los ensayos hay que estudiar el intervalo de dispersión de las mismas.

El valor de la densidad del hielo se asume como dato,

$$\rho = 916,8 \text{ kg/m}^3$$

Y mediante la relación entre densidad, masa y volumen,

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{A \cdot h} = \frac{m}{\pi \cdot r^2 \cdot h}$$

Se obtienen los valores ideales de masa para las tres alturas de cilindros disponibles.

$$m = \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h$$

- Probeta h = 42 mm:

$$m = 916,8 \cdot \pi \cdot 0,021^2 \cdot 0,042 = 53,35 \text{ g}$$

- Probeta h = 63 mm:

$$m = 916,8 \cdot \pi \cdot 0,021^2 \cdot 0,063 = 80,02 \text{ g}$$

- Probeta h = 84 mm:

$$m = 916,8 \cdot \pi \cdot 0,021^2 \cdot 0,084 = 106,69 \text{ g}$$

Con estos valores se haya el error relativo de cada uno de los datos de masa obtenidos frente al caso ideal.

$$Error\ relativo\ m\ (\%) = \frac{|m_{teórica} - m_{experimental}|}{m_{teórica}} \times 100$$

Además, conocidos los valores de las masas de los especímenes tras pesarlos al desmoldar, se puede obtener también el valor real de su altura y el error relativo correspondiente.

$$h = \frac{m}{\rho \cdot \pi \cdot r^2}$$

$$Error\ relativo\ h\ (\%) = \frac{|h_{teórica} - h_{experimental}|}{h_{teórica}} \times 100$$

MASA	ERROR RELATIVO m [%]	ALTURA [mm]	ERROR RELATIVO h [%]
51,35 g	3,75	40,4	3,81
51,47 g	3,52	40,5	3,57
54,38 g	1,93	42,8	1,90
49,18 g	7,82	38,7	7,86
48,49 g	9,11	38,2	9,05
78,65 g	1,71	61,9	1,75
81,04 g	1,27	63,8	1,27
76,27 g	4,69	60,0	4,76
82,27 g	2,81	64,7	2,70
81,06 g	1,30	63,8	1,27
109,23 g	2,38	86,0	3,61
109,11 g	2,27	85,9	3,49
110,9 g	3,95	87,3	5,18

Tabla 2. Valores de masa y altura y sus errores relativos.

Dado que todos los valores experimentales de masa y altura tienen un valor relativo inferior al 10 %, se asume que las probetas de ensayo son válidas debido a la débil dispersión de los datos. Esto permite afirmar que el error obtenido para los valores de masa se debe a los valores de altura y no a la estimación de la densidad o al diámetro de las probetas.

### **4.3. Análisis de impacto de percutor plano sobre probetas de hielo**

A pesar de realizar los ensayos en la torre de caída de peso, a la hora de analizar los datos de las primeras pruebas efectuadas se observó que los datos proporcionados por la torre no eran adecuados. Por esta razón, para los ensayos definitivos estudiados en este trabajo se decidió recurrir al análisis de los datos mediante las señales de un acelerómetro que se instaló en el percutor, así como mediante el programa de análisis de vídeo Tracker

#### ***4.3.1. Análisis de datos obtenidos por la adquisición de datos de la torre de caída de peso***

La torre de caída de peso proporciona valores de fuerza, energía, velocidad y desplazamiento en la dirección de impacto en función del tiempo.

Antes de lanzar el ensayo hay que elegir el valor de la energía de impacto. Cuando el percutor está en lo alto, toda la energía es potencial, mientras que abajo del todo, por conservación de la energía mecánica, la energía potencial pasa a ser energía cinética.

- Instante inicial:

$$E_p = mgh$$

$$E_c = 0$$



- Instante final:

$$E_p = 0$$

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Siendo,

$E_p$ , energía potencial  $[\text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}]$

$E_c$ , energía cinética  $[\text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}]$

$m$ , la masa  $[\text{kg}]$

$g$ , la fuerza de la gravedad  $[\text{m/s}^2]$

$h$ , la altura desde la base del percutor hasta la superficie superior de la probeta de hielo  $[\text{m}]$

Y por conservación de la energía cinética,

$$E_p = E_c$$

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2$$

$$v = (2gh)^{\frac{1}{2}}$$

Los datos proporcionados por la torre no se han analizado con el lenguaje de programación Python ya que la torre registra gran cantidad de ruido, alterando así los valores de fuerza y proporcionando datos erróneos y poco fiables.

A continuación se recogen los parámetros iniciales de energía, altura y velocidad de las probetas de ensayo.

<b>HIELO</b>	<b>ENERGÍA E [J]</b>	<b>ALTURA h [m]</b>	<b>VELOCIDAD v [m/s]</b>
51,35 g	2J	0,048779	0,978115
51,47 g	2J	0,048779	0,978115
54,38 g	4J	0,097557	1,383263
49,18 g	4J	0,097557	1,383263
48,49 g	8J	0,195114	1,95623
78,65 g	2J	0,048779	0,978115
81,04 g	2J	0,048779	0,978115
76,27 g	4J	0,097557	1,383263
82,27 g	4J	0,097557	1,383263
81,06 g	8J	0,195114	1,95623
109,23 g	4J	0,097557	1,383263
109,11 g	4J	0,097557	1,383263
110,9 g	8J	0,195114	1,95623

Tabla 3. Condiciones iniciales de los ensayos.

#### ***4.3.2. Análisis de datos obtenidos mediante el programa Tracker de análisis de vídeo***

A la hora de analizar los datos obtenidos con este programa es importante destacar que los valores de desplazamiento vertical no se corresponden con los valores de desplazamiento de las probetas de hielo, es decir, no indican la pérdida de altura de los especímenes de hielo ensayados. En efecto, los valores de desplazamiento se toman unos instantes antes del contacto entre el percutor y el hielo. Estos frames anteriores al impacto permiten obtener bien la velocidad inicial.

Para conocer el valor real de desplazamiento de los diferentes hielos cilíndricos, es decir, la reducción de altura que experimentan, hay que restarle al desplazamiento máximo el valor de desplazamiento del percutor previo al impacto (tabla 3).

<b>HIELO</b>	<b>DESPLAZAMIENTO MÁXIMO [m]</b>	<b>DESPLAZAMIENTO PREVIO AL IMPACTO [m]</b>	<b>DESPLAZAMIENTO REAL DEL HIELO [m]</b>
51,35 g	0,003075	0,001206	0,001869
51,47 g	0,003302	0,001638	0,001664
54,38 g	0,008543	0,003117	0,005426
49,18 g	0,006531	0,002521	0,00401
48,49 g	0,01065	0,003378	0,007272
78,65 g	0,009187	0,003264	0,005923
81,04 g	0,004024	0,003298	0,000726
76,27 g	0,007437	0,003238	0,004139
82,27 g	0,01106	0,003575	0,007485
81,06 g	0,01462	0,004014	0,010606
109,23 g	0,0094	0,002613	0,006787
109,11 g	0,005038	0,00326	0,001778
110,9 g	0,02142	0,002308	0,019112

Tabla 4. Desplazamiento real de cada una de las probetas.

Para entender cómo evolucionan los valores de desplazamiento, velocidad y aceleración, se exponen a continuación los gráficos obtenidos para el espécimen de hielo de masa  $m = 81,06$  g. El intervalo de tiempo mostrado se corresponde únicamente con la duración del impacto.

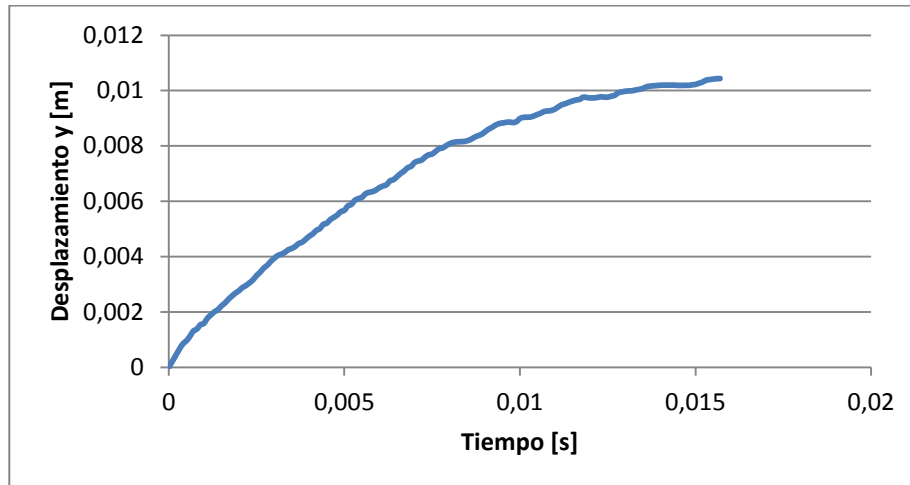


Figura 22. Desplazamiento en el eje y del hielo de masa  $m = 81,06$  g.

El desplazamiento crece rápidamente al inicio del impacto ya que, al producirse el contacto entre el percutor y el hielo, éste rompe y empieza a fisurar (figura 22). A medida que el impacto avanza, el desplazamiento crece más despacio, el valor de la pendiente disminuye y al finalizar el impacto, el desplazamiento se vuelve constante, se estabiliza, el hielo se ha fisurado por completo.

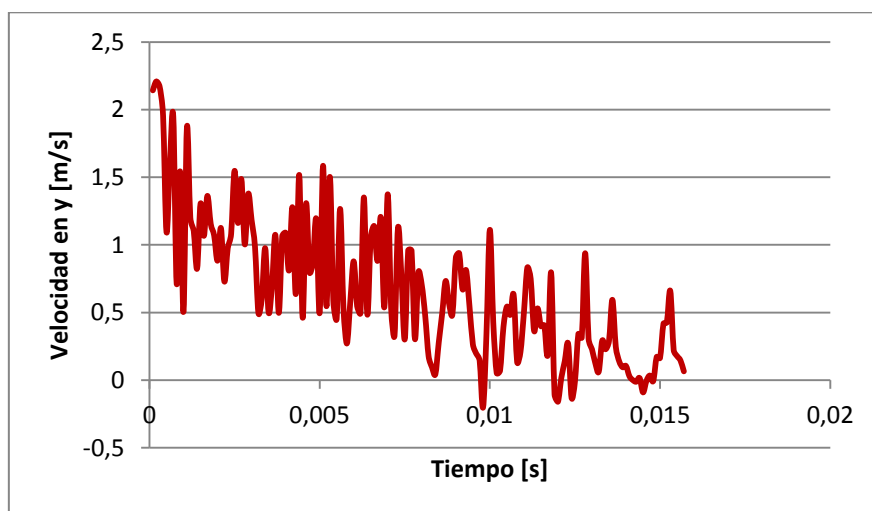


Figura 23. Velocidad en el eje y del hielo de masa  $m = 81,06$  g.

La velocidad viene dada por la derivada del desplazamiento respecto al tiempo, es decir que la pendiente de la curva de desplazamiento nos aporta información sobre la tendencia de esta magnitud. En efecto, la velocidad va disminuyendo a lo largo del intervalo de tiempo que dura el impacto (figura 23). El hielo frena al percutor hasta que la velocidad se anula cuando el desplazamiento se vuelve constante, al no haber incrementos de desplazamiento, no hay velocidad.

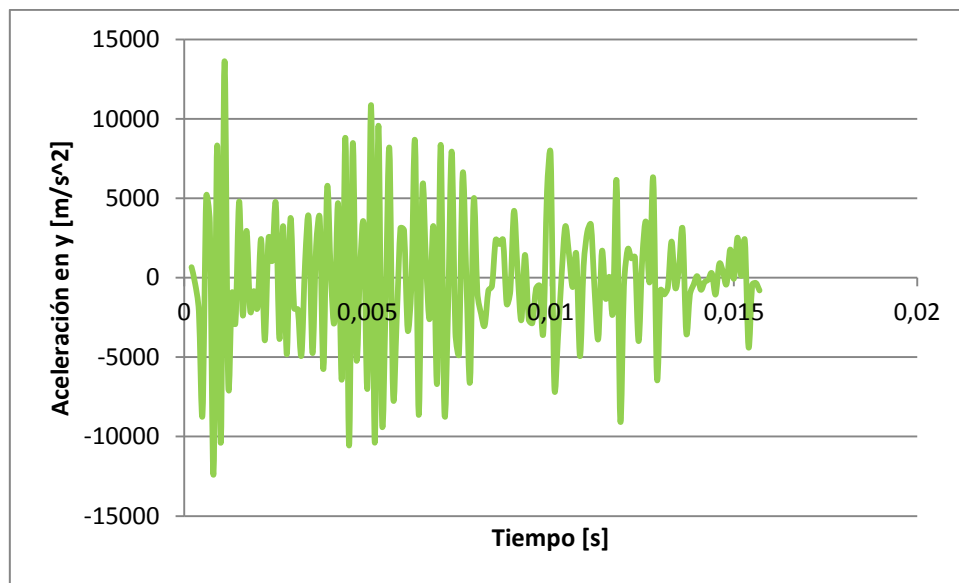


Figura 24. Aceleración en el eje y del hielo de masa  $m = 81,06$  g.

En el caso de la aceleración (figura 24), ésta crece al iniciarse el impacto y va disminuyendo. Las fluctuaciones presentes se deben a los cambios de velocidad ya que ésta última tampoco es perfectamente lineal en su decrecimiento. El primer pico de aceleración se corresponde con el inicio del contacto entre percutor y probeta, y será en este instante de tiempo donde se encuentre el pico de fuerza máxima de impacto.

Cabe destacar que las gráficas anteriores muestran la evolución de las variables de desplazamiento, velocidad y aceleración de la probeta, que se corresponde con el desplazamiento del percutor pero sólo mientras que dura el impacto. Es decir que se toma como instante inicial el momento en el que ocurre el contacto entre la masa y el hielo. Para obtener estas curvas, se han acondicionado los valores de velocidad y aceleración calculándolos mediante cociente de incrementos, utilizando únicamente los

desplazamientos reales de las probetas tomando como instante inicial el inicio del impacto.

$$v_y = \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1}$$

$$a_y = \frac{v_{y_3} - v_{y_2}}{t_3 - t_2}$$

El primer valor de velocidad se obtiene para el segundo punto de la gráfica de desplazamiento, mientras que el primer valor de aceleración se obtiene para el tercero, debido al uso de incrementos para calcular estas dos variables.

Por último, aunque el valor de la energía de impacto no se necesita para el cálculo de la fuerza sufrida por el hielo, el estudio de su evolución puede resultar determinante para comprender la dependencia de esta magnitud con los valores de fuerza obtenidos.

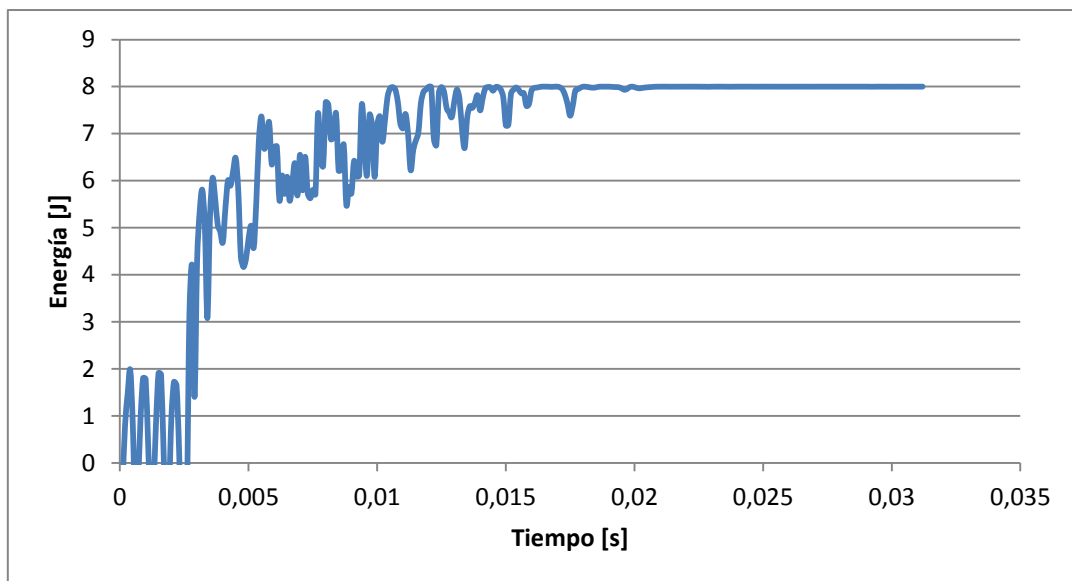


Figura 25. Energía absorbida por el hielo de masa  $m = 81,06$  g ( $E=8$ J).

Para obtener la energía absorbida por la probeta de hielo, se han restado los 8J de energía potencial presentes en el instante inicial, antes de dejar caer el percutor, a la energía cinética obtenida durante el impacto del percutor sobre la probeta. Tal y como muestra la gráfica (figura 25), la energía cinética alcanzada al finalizar el impacto es de 8J, lo que significa que los 8J de energía inicial han sido completamente absorbidos por la probeta de hielo.

Para poder comparar los diferentes ensayos, se realizan dos tipos de gráficas:

- Desplazamiento de todas las probetas de misma altura a diferentes energías.
- Desplazamiento de las probetas ensayadas con la misma energía pero de diferentes alturas.

Hay probetas de tres alturas diferentes (tabla 1), por lo que se han construido tres gráficas para el primer caso.

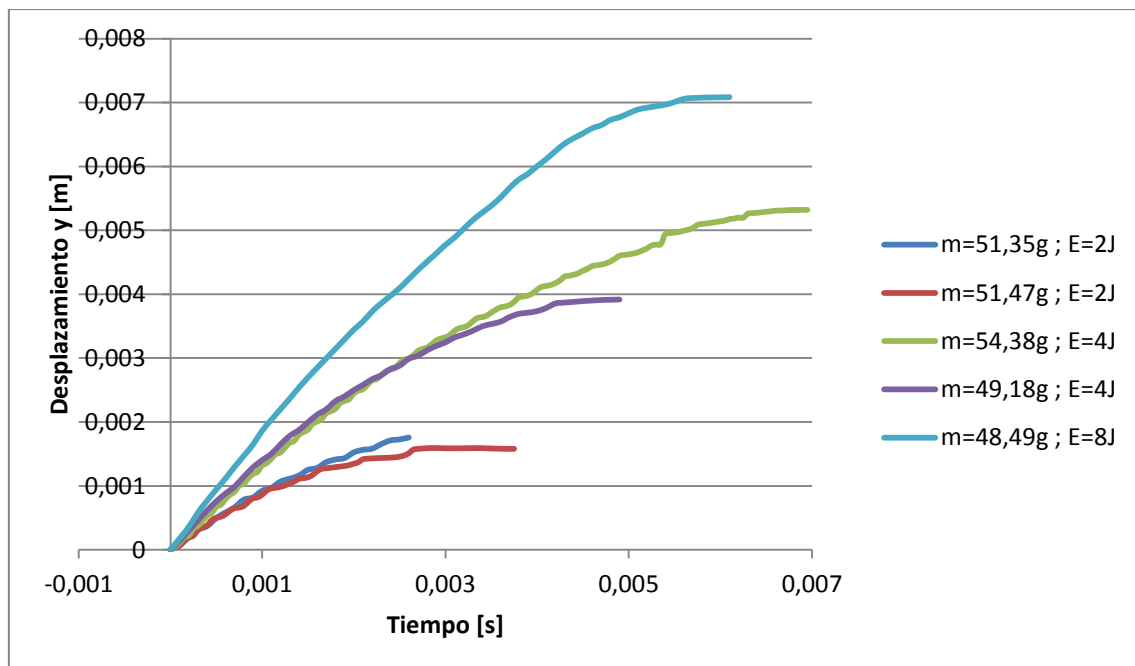


Figura 26. Desplazamiento en el eje y de las probetas de altura  $h = 42$  mm.

En función de las energías de impacto empleadas en cada uno de estos cinco ensayos (tabla 1) se distinguen tres tendencias bien diferenciadas (figura 26). Es observable que las probetas ensayadas con una mayor energía sufren un mayor desplazamiento.

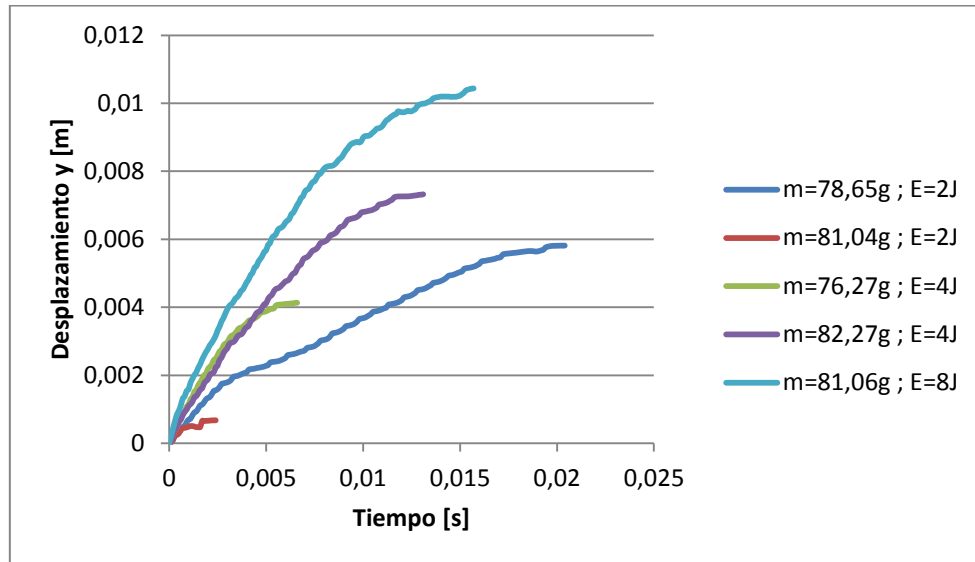


Figura 27. Desplazamiento en el eje y de las probetas de altura  $h = 63$  mm.

Al igual que para las probetas de altura  $h = 42$  mm, en este caso también se distinguen tres tendencias en las curvas de desplazamiento de las probetas de tamaño intermedio (figura 27). Por cada energía empleada, 2J, 4J y 8J, el desplazamiento sigue un mayor o menor crecimiento.

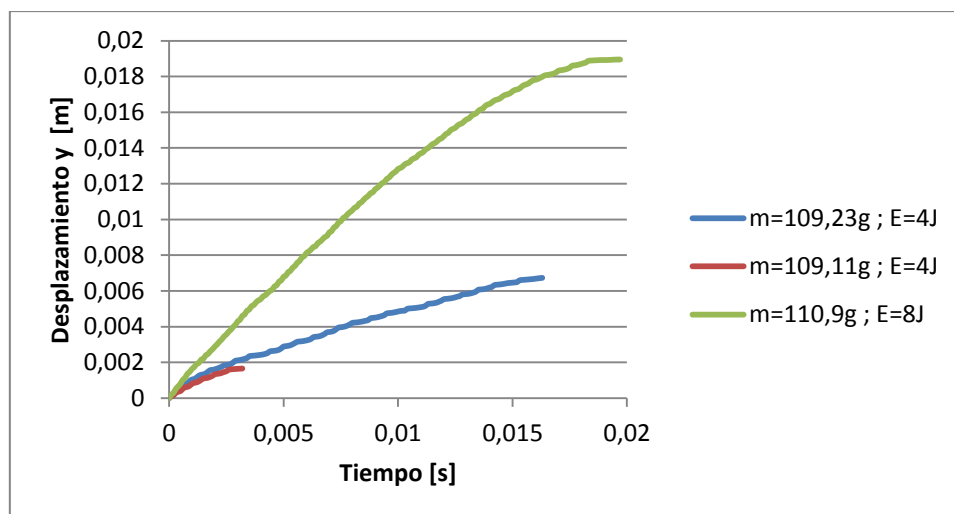


Figura 28. Desplazamiento en el eje y de las probetas de altura  $h = 84$  mm.



Para los especímenes de hielo de altura  $h = 84 \text{ mm}$  se han empleado únicamente dos energías en los ensayos, 4J y 8J, por lo que en este caso sólo hay dos tendencias pero se cumple lo mismo que para los casos anteriores (figura 28).

Recordando la segunda comparativa, a continuación se exponen las gráficas del desplazamiento de las probetas ensayadas con la misma energía pero de diferentes alturas. Esto se ha hecho para la energía intermedia, 4J (figura 29).

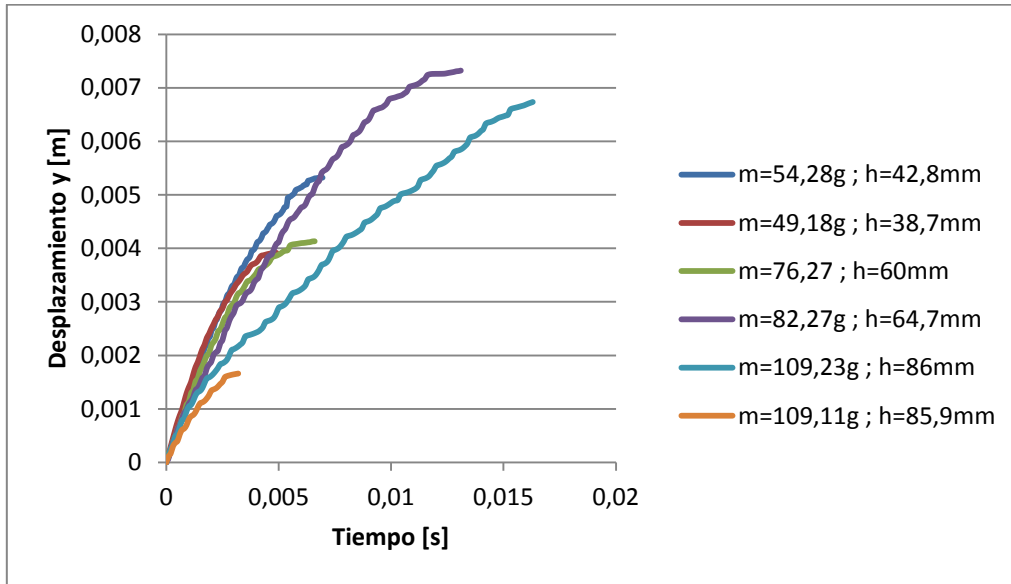


Figura 29. Desplazamiento en el eje y de las probetas ensayadas a 4J.

Gráficamente se observa que a medida que la altura de la probeta aumenta, hielos de mayor masa, el desplazamiento se vuelve más progresivo, la pendiente es menor. Esto se debe a que el percutor puede ejercer un mayor recorrido sobre la probeta ya que hay más material para fisurar.

Para concluir el análisis de datos obtenidos mediante análisis de vídeo, se pueden obtener las deformaciones sufridas por las probetas ensayadas, así como la velocidad de deformación de las mismas.

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_i} = \frac{h_f - h_i}{h_i} = \frac{h_f}{h_i} - 1$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad ; \quad \dot{\varepsilon}_m = \frac{\varepsilon_{Total}}{t_{impacto}}$$

<b>HIELO</b>	<b>DESPLAZAMIENTO O [mm]</b>	<b>DEFORMACIÓN TOTAL</b>	<b>TIEMPO DE IMPACTO [s]</b>	<b>VELOCIDAD MEDIA DE DEFORMACIÓN N [s<sup>-1</sup>]</b>
51,35 g	1,869	-0,04626238	0,0026	17,7932216
51,47 g	1,664	-0,04108642	0,00375	10,9563786
54,38 g	5,426	-0,1267757	0,00695	18,241108
49,18 g	4,01	-0,10361757	0,0049	21,1464431
48,49 g	7,272	-0,19036649	0,0063	30,2169035
78,65 g	5,923	-0,09568659	0,0204	4,69051918
81,04 g	0,726	-0,01137931	0,0024	4,74137931
76,27 g	4,139	-0,06898333	0,0066	10,4520202
82,27 g	7,485	-0,11568779	0,0131	8,83112899
81,06 g	10,606	-0,16623824	0,0157	10,5884232
109,23 g	6,787	-0,0789186	0,0163	4,84163219
109,11 g	1,778	-0,02069849	0,0032	6,46827707
110,9 g	19,112	-0,21892325	0,0197	11,1128555

Tabla 5. Deformaciones y velocidades de deformación experimentadas por las probetas.

Según los datos obtenidos (tabla 5), se cumple que para alturas más bajas las velocidades de deformación son más altas por lo que la decisión de emplear probetas de tres alturas diferentes ha sido correcta para analizar la relación de estas magnitudes.

### **4.3.3. Análisis de datos obtenidos por el sistema de adquisición acelerómetro-dewetron**

Tal y como se explicó en el capítulo anterior, el acelerómetro mide la amplitud de las vibraciones del impacto. De modo que el valor de la fuerza se obtiene del siguiente modo:

$$F[N] = Volt \times 4,181 \div 0,01027$$

Siendo,

*Volt*, el valor de la amplitud [V]

4,181 kg, la masa del percutor

0,01027 V/ (m/s<sup>2</sup>), la sensibilidad del acelerómetro

Mediante el editor Spyder de Python se ha representado y filtrado el valor de la fuerza de impacto resultante de la señal del acelerómetro. Para saber qué valores de fuerza son determinantes, es indispensable conocer lo que dura el impacto en cada ensayo. Para ello, se visualizan los vídeos y se comprueba el frame de inicio del impacto y el frame final de este.

$$Total\ frames\ del\ impacto = frame_{f\ imp.} - frame_{i\ imp.}$$

$$Duración\ del\ impacto = \frac{Total\ frames\ del\ impacto}{100000\ fps}$$

<b>HIELO</b>	<b>FRAME INICIO DEL IMPACTO</b>	<b>FRAME FINAL DEL IMPACTO</b>	<b>TOTAL FRAMES DEL IMPACTO</b>	<b>DURACIÓN DEL IMPACTO [s]</b>
51,35 g	130	390	260	0,0026 s
51,47 g	195	570	375	0,00375 s
54,38 g	240	935	695	0,00695 s
49,18 g	170	660	490	0,0049 s
48,49 g	180	810	630	0,0063 s
78,65 g	480	2520	2040	0,0204 s
81,04 g	600	840	240	0,0024 s
76,27 g	260	920	660	0,0066 s
82,27 g	320	1630	1310	0,0131 s
81,06 g	230	1800	1570	0,0157 s
109,23 g	270	1900	1630	0,0163 s
109,11 g	380	700	320	0,0032 s
110,9 g	150	2120	1970	0,0197 s

Tabla 6. Resumen de los tiempos de impacto de los ensayos.

A continuación se muestra la curva de fuerza obtenida por el sistema acelerómetro-dewetron para el hielo de masa  $m = 78,65$  g a modo de ejemplo. La curva en amarillo representa la señal completa, siendo la de color verde la señal filtrada a 2kHz para eliminar el ruido. Se muestra el tramo correspondiente con el tiempo de impacto, siendo este muy variable de unas probetas a otras (tabla 4).

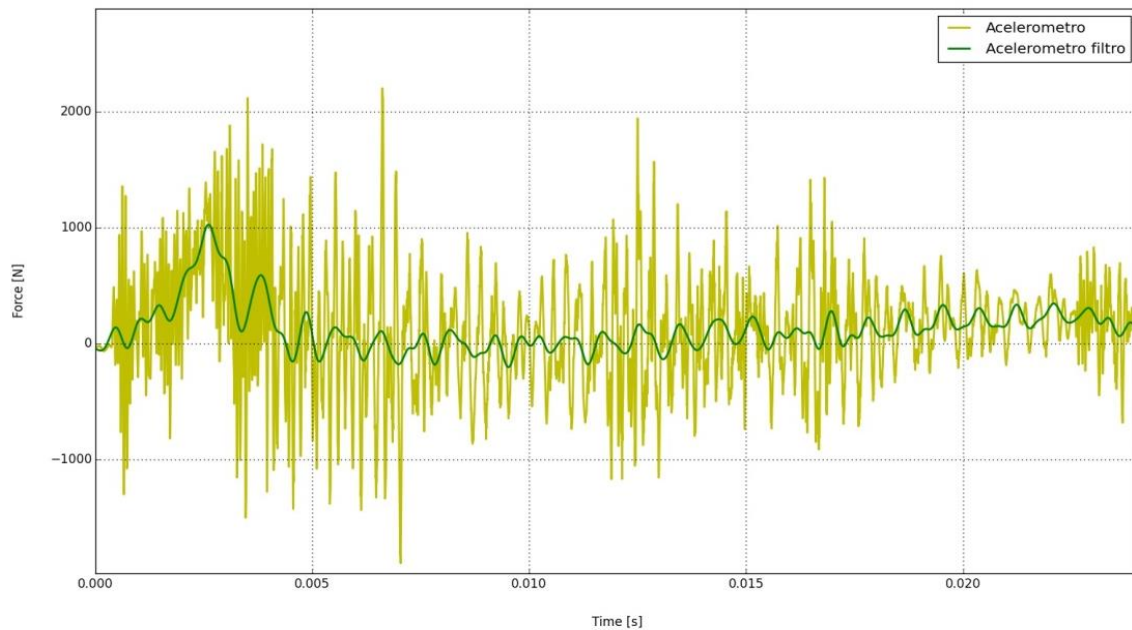


Figura 30. Gráfica de las variaciones de fuerza de impacto  $F(t)$  del hielo de masa  $m = 78,65$  g.

El contacto se produce en el instante  $t = 0$  s, sin embargo el pico de fuerza mayor se obtiene en  $t = 0,0025$  s. Es en este instante cuando se produce el impacto total. A partir de aquí los valores de fuerza caen aproximándose a cero hasta que el hielo se fisura por completo y concluye el impacto (figura 30).

#### 4.4. Comparación y discusión: Acelerómetro vs. Análisis de Vídeo con Tracker

Para comparar los valores de fuerza obtenidos mediante la señal del acelerómetro y el programa de análisis de vídeo, se han representado gráficamente los datos de ambas herramientas en Python.

A continuación, a modo de ejemplo, se muestra la gráfica obtenida para el hielo de masa  $m = 48,49$  g.

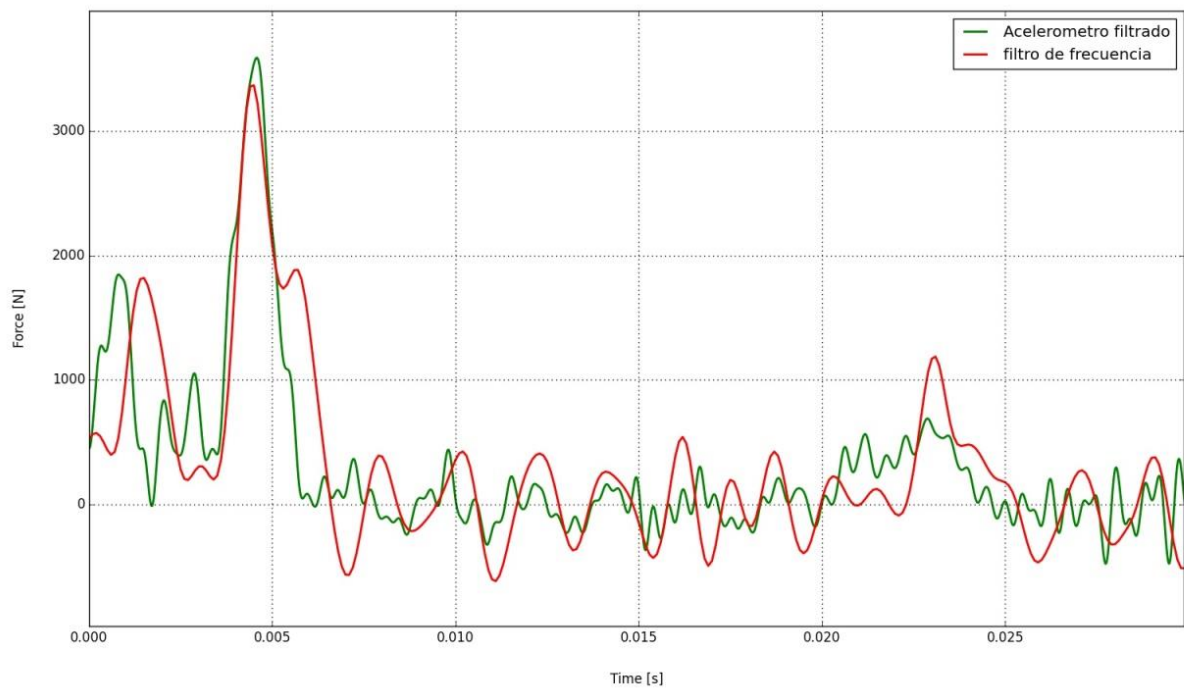


Figura 31. Gráfica comparativa de los espectros de fuerza de acelerómetro y Tracker para el hielo  $m = 48,49$  g.

Estas curvas muestran únicamente las señales filtradas, tanto del acelerómetro como del programa de análisis de vídeo, para así ver la tendencia de los valores de fuerza con mayor claridad y exactitud, facilitando la comparativa. La señal del acelerómetro se ha filtrado a 2kHz, mientras que la del programa Tracker se ha filtrado a 0,8 kHz. En efecto, el acelerómetro también recoge ruido, frecuencias que deben ser eliminadas para la optimización de los resultados; el programa Tracker por su lado no proporciona una precisión total ya que los valores de desplazamientos de los cuales dependen velocidad y aceleración, y por lo tanto la fuerza, vienen dados por el seguimiento de una huella, por lo que la nitidez del vídeo resulta tener un carácter importante en los resultados.

La curva de color verde es la señal filtrada del acelerómetro, siendo la roja la del programa de análisis de vídeo. Se observa que ambas curvas tienen el mismo aspecto y valores muy próximos de fuerza (tabla 5), destacando los puntos con picos de fuerza importantes.

Esta concordancia en las tendencias de las dos curvas se obtiene para todas las probetas ensayadas, validando así los dos métodos de adquisición de datos empleados.

<b>HIELO</b>	<b>FUERZA MÁXIMA ACELERÓMETRO [N]</b>	<b>FUERZA MÁXIMA TRACKER [N]</b>
51,35 g	1828,56	1908,53
51,47 g	1883,99	1866,29
54,38 g	1087,64	1111,35
49,18 g	1816,86	1941,02
48,49 g	3590,44	3368,66
78,65 g	1426,88	1025,42
81,04 g	2010,2	2071,66
76,27 g	924,653	1398,85
82,27 g	2862,87	2386,49
81,06 g	3642,49	3234,87
109,23 g	1948,76	1374,68
109,11 g	1411,21	1458,88
110,9 g	2492,81	2889,92

Tabla 7. Valores máximos de fuerza de la comparativa acelerómetro-Tracker.

Hay una gran similitud entre los valores de fuerza obtenidos con el acelerómetro y los obtenidos mediante Tracker (tabla 7), lo que es muy positivo para la discusión de los resultados.

Dado que se muestran las fuerzas máximas en función tanto de energía y altura (figura 32), no es evidente conocer la dependencia entre las magnitudes representadas. Por ello se van a estudiar por separado.

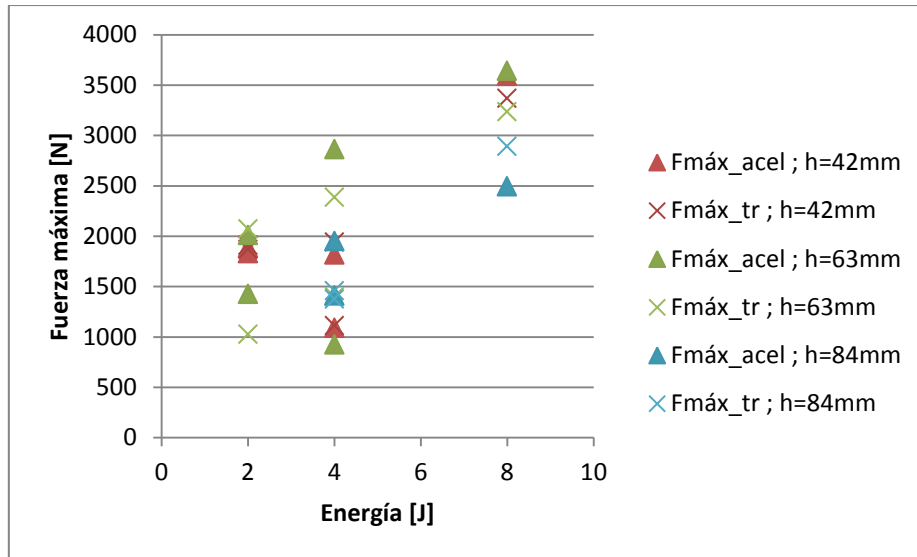


Figura 32. Dependencia de las fuerzas máximas con las energías de ensayo.

La observación principal (figura 33) es que las fuerzas máximas aumentan con la altura de la probeta cuando lo hace la energía.

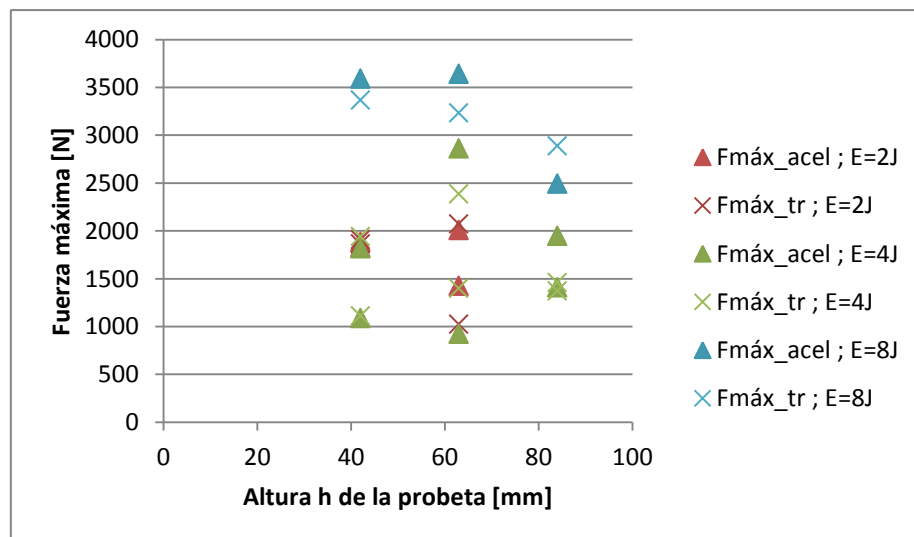


Figura 33. Dependencia de las fuerzas máximas con la altura de las probetas.



No se aprecia una dependencia evidente entre la altura de las probetas y las fuerzas máximas obtenidas en cada caso, tal y como sí que ocurre en la altura y la velocidad de deformación. En efecto, las diferencias en los valores de fuerza se deben a las energías empleadas en cada ensayo y no a la altura de los especímenes de hielo.

Una vez conocidos y discutidos los valores de fuerza, resulta interesante conocer los valores de resistencia a compresión de las probetas de hielo frente al impacto y discutir la dispersión de los datos frente a los valores de la velocidad de deformación del hielo (figura 35).

$$\sigma_c = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi \cdot r^2} = \frac{F}{\pi \cdot 0,021^2}$$

Y dado que se han obtenido valores de fuerza mediante dos métodos diferentes, hay que hallar también dos valores de tensión a compresión para cada probeta (tabla 7).

<b>HIELO</b>	<b><math>\sigma_{c\_acelerómetro}</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_{c\_tracker}</math> [MPa]</b>
51,35 g	1,32	1,38
51,47 g	1,36	1,35
54,38 g	0,79	0,80
49,18 g	1,31	1,40
48,49 g	2,59	2,43
78,65 g	1,03	0,74
81,04 g	1,45	1,50
76,27 g	0,67	1,01
82,27 g	2,07	1,72
81,06 g	2,63	2,33
109,23 g	1,41	0,99
109,11 g	1,02	1,05
110,9 g	1,80	2,09

Tabla 8. Tensiones de compresión producidas por el impacto.

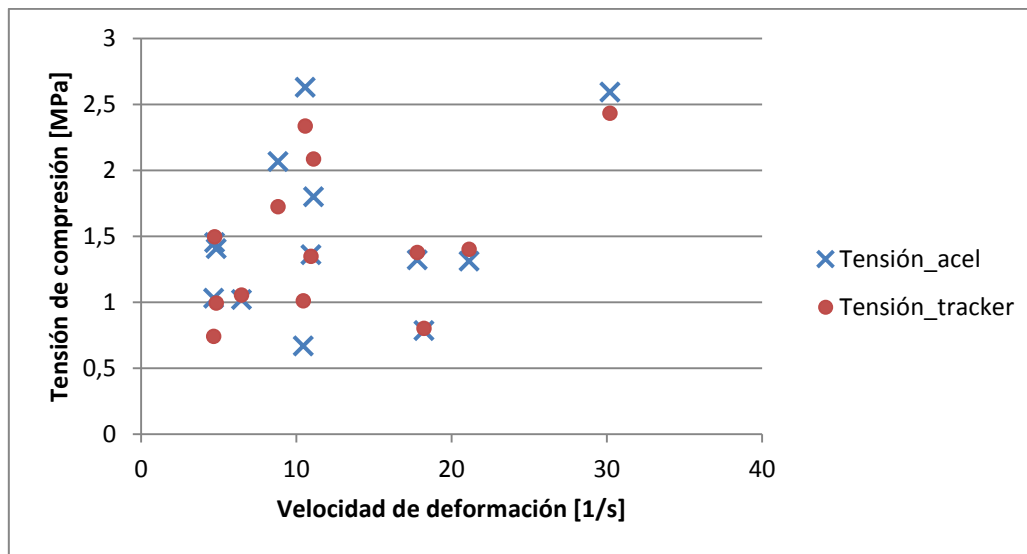


Figura 34. Evolución de la tensión de compresión frente a la velocidad de deformación.

Se observa una tendencia creciente de la tensión de compresión que experimenta la probeta en función de la velocidad de deformación (figura 35), lo cual concuerda con los resultados de otros autores hallados en la literatura. Sin embargo, los valores obtenidos son bajos comparados con los de estos autores (figura 10). Esto puede deberse a las condiciones de ensayo, las cuales hacen que las probetas no experimenten una rotura puramente de compresión.

## 4.5. Análisis de la fractura

Para terminar de validar los métodos empleados para la obtención de la fuerza de impacto sobre la probeta, es necesario relacionar las imágenes grabadas con la esta magnitud.

Tras la visualización de los videos grabados con la cámara de alta velocidad durante el desarrollo de los ensayos en la torre de caída de peso, y mostrando especial atención a los imágenes en las que ocurre el primer contacto entre el percutor plano y la superficie superior de los especímenes de hielo, se observa que al comprimir en el eje vertical y por defecto, al traccionar en el eje horizontal de los cilindros de hielo, se

producen fisuras verticales que atraviesan el hielo de extremo a extremo y se propagan sobre todo el volumen de la probeta ensayada, causando la fractura del material (figura 35).

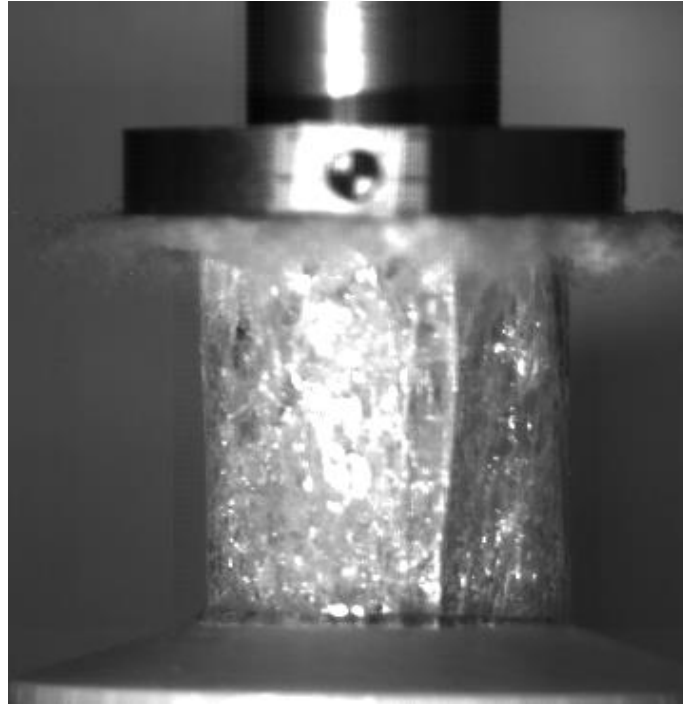


Figura 35. Aparición de una fisura vertical en el espécimen de  $m = 81,06$  kg tras el impacto.

Para completar el análisis de la fractura, se representa una curva de los valores de fuerza y se relaciona con las imágenes obtenidas en el vídeo destacando los puntos más representativos (figura 36).

- La primera imagen muestra el inicio del contacto entre el percutor y el bloque de hielo que va a ser impactado. Esta imagen se corresponde con el instante  $t = 0$  s, instante inicial del impacto.
- La segunda imagen muestra las primeras fracturas del material ensayado debido a la fuerza de compresión ejercida en la dirección de impacto. En este punto la fuerza está creciendo.
- La tercera imagen muestra una fractura más evidente, aquí se alcanza la fuerza máxima.

- La cuarta imagen también se corresponde con un pico de fuerza, aunque menor que el anterior, responsable de la aparición de una fisura vertical muy notable que recorre toda la longitud del espécimen de hielo.
- La quinta y última imagen marca el final del impacto. Aquí el desplazamiento se mantiene constante, el percutor deja de avanzar, y la fuerza toma valores muy próximos a cero ya que el hielo ha fisurado por completo.

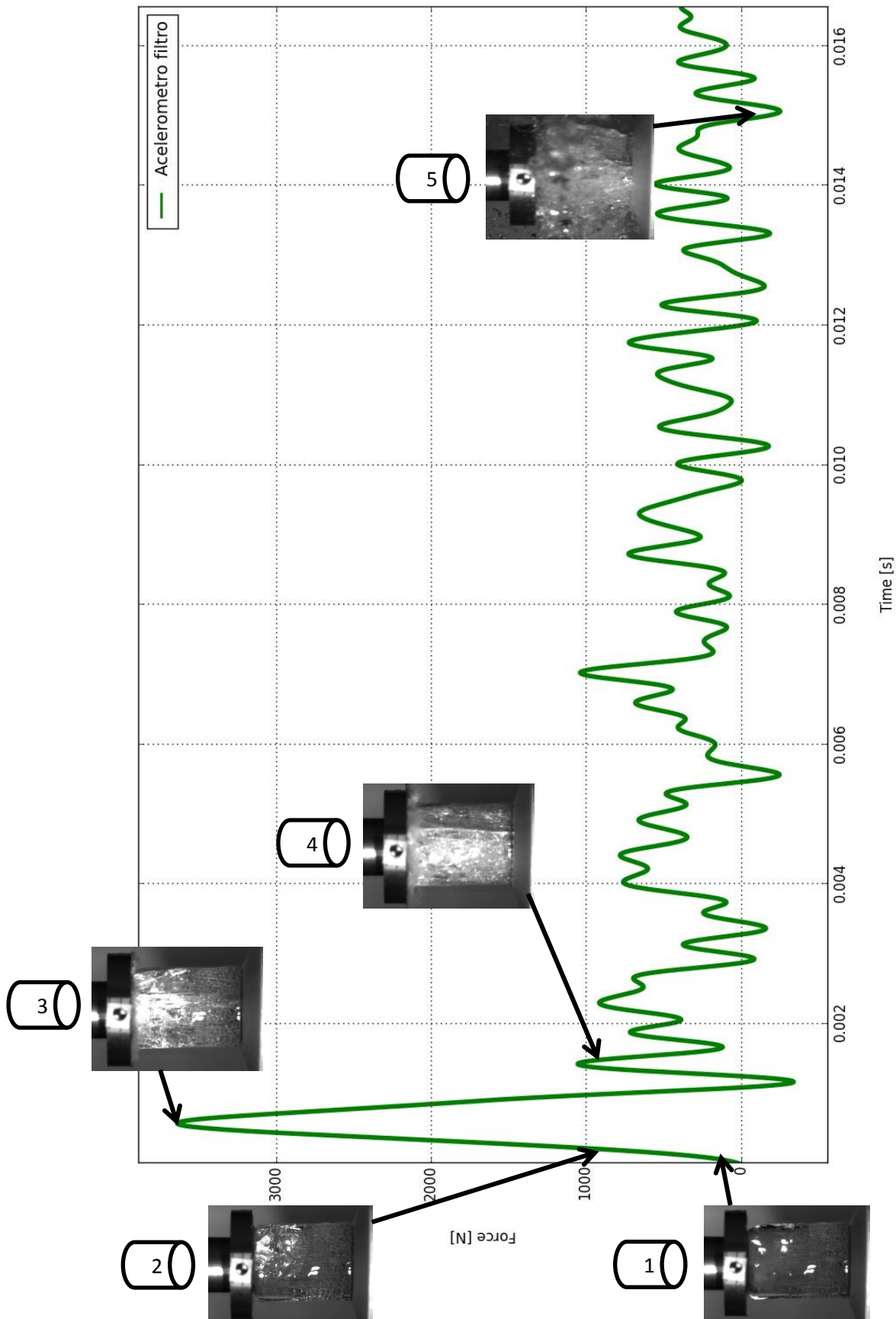


Figura 36. Relación de la fuerza con las imágenes grabadas.

# Capítulo 5

## Conclusiones y trabajos futuros

### 5.1. Introducción

En este trabajo se ha estudiado el análisis del comportamiento dinámico del hielo. Para ello se han realizado ensayos con la torre de caída de peso, impactando mediante un percutor plano sobre especímenes de hielo previamente conformados por congelación con la forma y tamaño deseados. Concretamente, se han empleado probetas de tres alturas a tres energías de impacto, 2J, 4J y 8J.

Posteriormente, para analizar y validar los ensayos se ha empleado un lenguaje de programación, Python, con su correspondiente editor, Spyder para representar los valores de la fuerza de impacto frente al tiempo. A sí mismo, se ha empleado el programa Tracker de análisis de vídeo para analizar el desplazamiento de la probeta de hielo debido al impacto y para poder observar la fractura y la propagación de las fisuras.

## **5.2. Conclusiones**

- Se han cortado cilindros de hielo de tres longitudes y mismo diámetro para conformar los especímenes de hielo a ensayar. Se ha elegido esta forma ya que el percutor plano también tiene base circular y ya que es una geometría fácil de desmoldar evitando imperfecciones en las probetas de hielo durante el proceso.
- Se ha diseñado una matriz mediante Solid Edge para imprimirla en 3D e incorporarla en el fondo del molde de congelación, elevar de este modo los cilindros y así permitir que el agua fluya por debajo de los mismos evitando la aparición de burbujas de aire que puedan quedar ocluidas en el hielo.
- Se comprueba que a mayor altura de probeta, menor velocidad de deformación.
- De los ensayos y posterior obtención y discusión de resultados se aprecian comportamientos similares en los distintos especímenes frente al impacto. Lo más destacable es que al aumentar la energía de ensayo y por lo tanto al aumentar la velocidad de ensayo aumenta también la fuerza aplicada sobre las probetas.
- Además, a mayor altura de probeta, menor es la pendiente de la curva de desplazamiento, es decir que éste es más progresivo y la velocidad es menos variable.
- Debido al factor de dispersión presente en cada estudio experimental, ciertos cilindros de hielo no eran perfectamente planos en su superficie de impacto. En estos hielos, el desplazamiento era más progresivo, y el impacto impreciso provocando una disminución de la fuerza de impacto.

## **5.3. Trabajos futuros**

Con posterioridad a este trabajo fin de grado, pueden llevarse a cabo otros estudios que amplíen los conocimientos de éste y aporten nuevas conclusiones.

Una idea interesante sería hacer más ensayos cambiando la dirección de congelación de los especímenes respecto a la de impacto para confirmar la dependencia de la orientación de los granos de la microestructura con la resistencia del hielo.

Además, se podrían plantear distintos métodos para congelar; hacer probetas congeladas por láminas, agregando agua cada cierto tiempo una vez que la capa anterior haya solidificado, o bien machacando hielo previamente fabricado y recongelarlo. Estos ejemplos permitirían obtener diferentes estructuras y así poder ver su influencia en la propagación de fisuras, en su resistencia y en la fuerza admitida. En base a esto, podría realizarse algún tipo de ensayo no destructivo que permitiese una visualización de las fisuras para establecer en la medida de lo posible un patrón de fractura del material.



# Bibliografía

- [1] nsidc.org/articseaicenews/. National Snow and Ice Data Center, Sea Ice Index, Version 2, 06 July 2016.
- [2] www.nasa.gov.
- [3] María José Viñas y Kate Ramsayer. Centro de Vuelo Espacial Goddard de la NASA en Greenbelt, Maryland. *NASA Monitors the “New Normal” of Sea Ice*, Aug.19,2016
- [4] D. M. Cole. The microstructure of ice and its influence on mechanical properties. *Engineering Fracture Mecahnics*, 68(17-18):1797-1822, 2001.
- [5] R. L. Hooke and M. Mellor. Mechanical properties of polycrystalline knowledge and properties for research in ice: an assessment of current report prepared for the international commission on snow and ice, with support from the U.S. National scientific. *Cold Regions Science and Technology Science*, 3:263-275, 1980.
- [6] E. Schulson. Brittle failure of ice. *Engineering Fracture Mechanics*, 68(17-18): 1839-1887, 2001.
- [7] A.Combescure, Y.Chuzel-Marmot, J.Fabis. Experimental study of high-velocity impact and fracture of ice. *International Journal of Solids and Structures*, 48:2779-2790, 2011.
- [8] J. Pernas Sánchez. *Análisis y simulación de impactos de hielo sobre laminados carbono/epoxi*. Tesis doctoral, 2013.
- [9] J.J. Petrovic. Mechanical properties of ice and snow. *Journal of Materials Science*, 38:1-6, 2003.
- [10] C. Santiuste Romero. *Análisis y modelización de vigas de tipo laminado sometidas a cargas impulsivas*. Tesis doctoral, 2007.
- [11] M. Chaplin. Water structures and science, 2012.
- [12] S. J. Jones. High Strain-Rate Compression Tests on Ice. *The Journal of Chemistry B*, 101(32):6099-6101, Aug. 1997.

- [13] H. Kim and J. N. Keune. Compressive strength of ice at impact strain rates. *Journal of Materials Science*, 2808-2806, 2007.
- [14] M. Shazly, V. Prakash, and B. A. Lerch. High strain-rate behavior of ice under uniaxial compression. *International Journal of Solids and Structures*, 46(6):1499-1515, 2009.
- [15] N. Sinha. Elasticity of natural types of polycrystalline ice. *Cold Regions Science and Technology*, 17:127-135, 1989.
- [16] *Comportamiento de componentes estructurales bajo cargas impulsivas*. Apuntes Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Universidad Carlos III de Madrid.
- [17] I. J. Jordaan. *Mechanics of ice structure interaction*, 68:1923-1960, 2001.
- [18] E. M. Schulson, P. Duval. *Creep and Fracture of Ice*. Cambridge University Press, 2009.
- [19] E. M. Schulson, D. Iliescu, A. L. Fortt. *Characterisation of ice for return to flight of the space shuttle*. Technical Note, NASA/CR-2005-13643/Part1, 2005.
- [20] E. M. Schulson, D. Iliescu. *Characterisation of ice for return to flight of the space shuttle*. Technical Note, NASA/CR-2005-23643/Part2-Soft Ice, 2005.
- [21] P. K. Dutta, D. M. Cole, E. M. Schulson, D. S. Sodhi. *A fracture study of ice under high strain rate loading*. Int. J. Offshore Polar Eng. 14:182-188, 2004.
- [22] E. L. Fasanella, R., K. S. Kellas. *Dynamic crush characterisation of ice*. Technical note, NASA/TM-2006-214278, 2006.

## Anexo A

### Observaciones de los ensayos

- **Hielo  $m = 51,35\text{ g}$**

Este hielo forma parte del grupo de las probetas de menor tamaño. Se ha ensayado con una energía de impacto de 2J. Al impactar, el percutor produce las primeras fisuras en la parte superior derecha del bloque de hielo, lugar en el que se produce el primer contacto entre el percutor de base plana y la superficie superior de la probeta, que presenta alguna irregularidad lo que hace que no sea perfectamente plana y lisa, impidiendo el contacto total entre las dos superficies durante el primer contacto de impacto.

El vídeo obtenido consta de 390 frames visualizados a lo largo de 19,5 segundos (20,00 imágenes/s).

- **Hielo  $m = 51,47\text{ g}$**

Esta probeta también es de las pequeñas y como en el caso anterior se ensaya a una energía de impacto de 2J, por lo que se podrán comparar sus desplazamientos, velocidades en la dirección de impacto y las fuerzas de compresión experimentadas.

En este caso, el impacto es más preciso, existiendo un contacto casi perfecto entre las superficies de percutor y probeta. Esto permite visualizar correctamente la fractura del hielo de la que se hablará al final de este capítulo.

El vídeo consta de 1015 frames visualizados a lo largo de 33,83 segundos (30,00 imágenes/s).

▪ **Hielo  $m = 54,38\text{ g}$**

Este hielo se ha sometido a una energía de impacto de 4J, produciéndose una primera fractura en la parte superior izquierda de la probeta, resultando de esta una pérdida de material a esta altura del bloque de hielo. Posteriormente el impacto se vuelve homogéneo tras el completo contacto entre percutor y probeta.

El vídeo está formado por 955 frames visualizados a lo largo de 31,83 segundos (30,00 imágenes/s).

▪ **Hielo  $m = 49,18\text{ g}$**

Al igual que para el hielo anterior, para su ensayo se emplea una energía de impacto de 4J, por lo que será conveniente compararlos entre sí y estudiar si siguen la misma tendencia.

El percutor impacta primero por la izquierda por lo que la fractura vertical de la probeta va de izquierda a derecha, fisurando así la totalidad del bloque de hielo.

El vídeo consta de 3380 frames visualizados a lo largo de 112,667 segundos (30,00 imágenes/s).

▪ **Hielo  $m = 48,49\text{ g}$**

Es la última probeta de las de menor tamaño y se ensaya a 8J. Al visualizar el vídeo grabado con la cámara de alta velocidad Photron, se observa que el hielo fractura en primer lugar, expandiéndose posteriormente las fisuras hacia los extremos a medida que el percutor entra en contacto con la totalidad de la superficie libre superior de la probeta.

El vídeo consta de 3290 frames visualizados a lo largo de 109,667 segundos (30,00 imágenes/s).

▪ **Hielo  $m = 78,65\text{ g}$**

Se trata del primer hielo de las probetas de altura intermedia ensayado con una energía de impacto de 2J. Este bloque cuenta con una ligera imperfección ya que presenta una fisura horizontal en el lateral izquierdo, próxima a la superficie libre superior de la probeta. Esto provoca que al impactar el percutor, la pérdida de material por fractura se inicie en este punto.

El vídeo consta de 2890 frames visualizados a lo largo de 96,333 segundos (30,00 imágenes/s).

▪ **Hielo  $m = 81,04\text{ g}$**

Como el anterior, la probeta es de altura intermedia y se ensaya a 2J. La característica más destacable de este espécimen es que ha sido congelado en posición horizontal, en lugar de en vertical como el resto, sin embargo, se ha ensayado en vertical como el resto de probetas. Esto permitirá sacar conclusiones acerca de la posible dependencia de la resistencia del hielo y la propagación de las fisuras con la dirección de congelación.

Durante este ensayo, el percutor impacta con la totalidad de la superficie libre de la probeta desde el primer contacto, lo que hace que sea una prueba precisa.

El vídeo consta de 3050 frames visualizados a lo largo de 101,667 segundos (30,00 imágenes/s).

▪ **Hielo  $m = 76,27\text{ g}$**

Esta probeta de hielo se ha ensayado con una energía de impacto de 4J, iniciándose la fractura inicial por la izquierda debido a un ligero desnivel de la superficie libre superior, más alta por este lado que por la derecha.

El vídeo consta de 3350 frames visualizados a lo largo de 111,667 segundos (30,00 imágenes/s).

▪ **Hielo  $m = 82,27\text{ g}$**

Al igual que con el espécimen anterior, la probeta se ha impactado con 4J. El contacto percutor-probeta ha sido perfectamente plano induciendo una fractura homogénea y fisuras sobre todo el cilindro de hielo.

El vídeo consta de 2800 frames visualizados a lo largo de 93,333 segundos (30,00 imágenes/s).

▪ **Hielo  $m = 81,06\text{ g}$**

Esta última probeta de altura intermedia se ha ensayado con una energía de impacto de 8J. El contacto percutor-hielo es limpio, es decir, perfectamente plano obteniéndose así una propagación homogénea de las fisuras.

El vídeo consta de 3120 frames visualizados a lo largo de 104 segundos (30,00 imágenes/s).

▪ **Hielo  $m = 109,23\text{ g}$**

Es el primero de los especímenes de mayor altura. Se ensaya a 4J, impactando el percutor por la derecha en primer lugar debido a una ligera inclinación de la probeta. Se produce una primera fisura diagonal.

El vídeo consta de 2960 frames visualizados a lo largo de 98,667 segundos (30,00 imágenes/s).

▪ **Hielo  $m = 109,11\text{ g}$**

La probeta de hielo se ensaya a 4J como en el caso interior lo que permite comparar este ensayo con el que le precede. Sin embargo, hay que tener en cuenta que en este caso el contacto en el impacto es plano, obteniendo así mejores resultado en esta prueba que en la anterior.

El vídeo consta de 3380 frames visualizados a lo largo de 112,667 segundos (30,00 imágenes/s).

▪ **Hielo  $m = 110,9\text{ g}$**

Este último bloque de hielo se ensaya con una energía de impacto de 8J. El vídeo muestra un buen contacto, plano, entre percutor y probeta.

El vídeo consta de 3650 frames visualizados a lo largo de 121,667 segundos (30,00 imágenes/s).

## **Anexo B**

### **Diagrama Gantt - Planificación**

La planificación de este trabajo fin de grado se ha dividido en 8 actividades principales que se exponen a continuación:

1. Estudio del tema de trabajo escogido, contexto y objetivos. Esta actividad se ha desarrollado a lo largo de todos los meses de trabajo ya que tratándose de un trabajo experimental, los objetivos han evolucionado a medida que se obtenían los resultados.
2. Realización de un índice orientativo y planificación de la metodología a seguir.
3. Planificación y realización de los ensayos de prueba para calibrar el equipo y ver el comportamiento del material frente al impacto. Esta actividad fue importante ya que dio lugar al esquema de ensayos definitivo tras analizar los resultados de los test.
4. Comprensión y valoración de los datos obtenidos por el equipo de medición en las sesiones de prueba y discusión de los mismos a través del lenguaje de programación Python y de la herramienta de análisis de vídeo Tracker (primer contacto con los programas anteriormente citados y familiarización con los mismos).
5. Esquema de los ensayos definitivos y su realización.
6. Tratamiento de datos mediante Python y Tracker.
7. Discusión de los resultados obtenidos y redacción de la memoria final del trabajo.
8. Corrección de la memoria antes de la entrega.

Todas las actividades, sus fechas de inicio y fin y su duración se presentan en el diagrama Gantt.



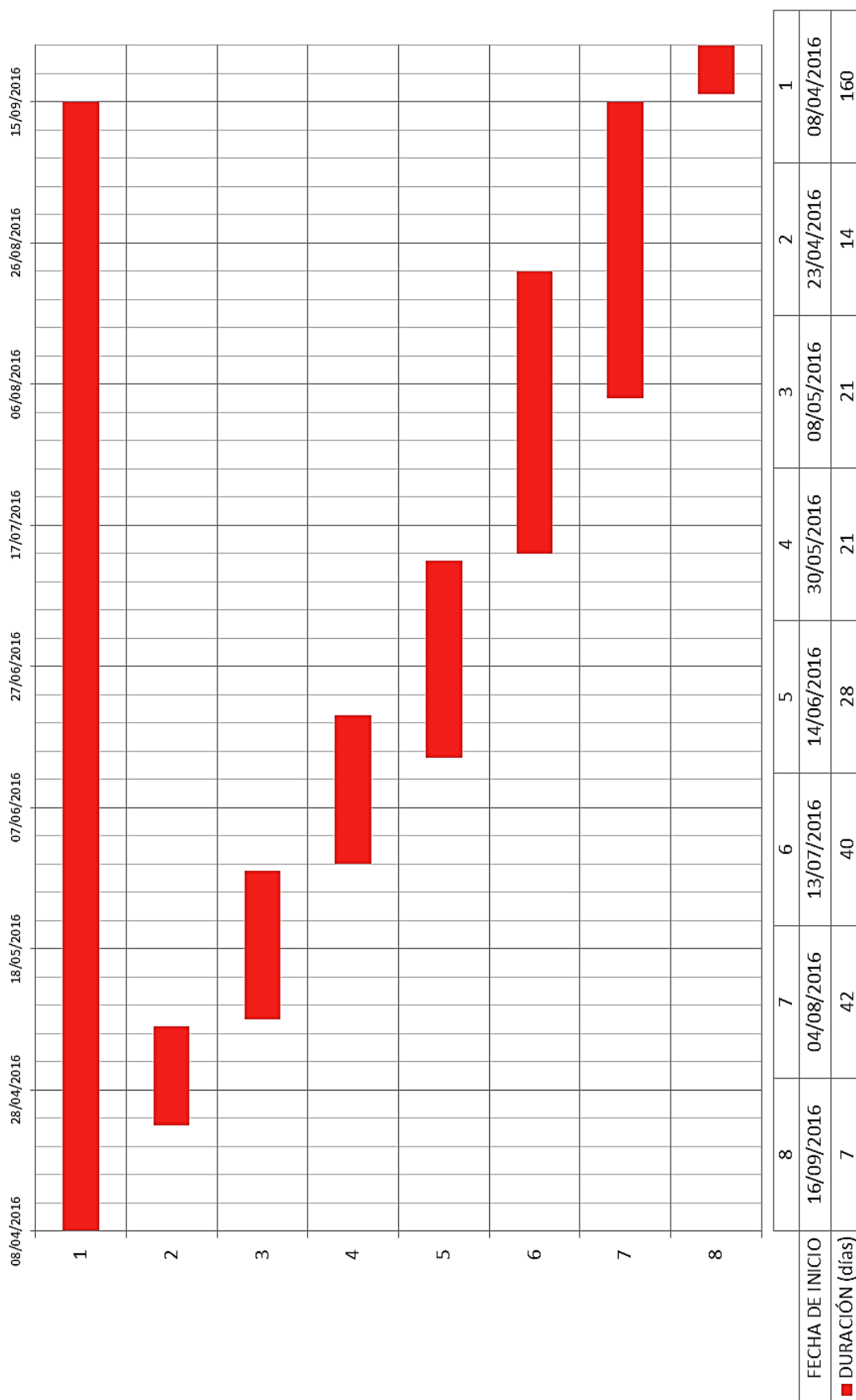


Figura 37. Diagrama Gantt.

# Anexo C

## Presupuesto

EQUIPO	COSTE	VIDA ÚTIL	AMORTIZACIÓN
Torre de caída de peso	78.500 €	10 años	31,4 €
Cámara de alta velocidad	130.060 €	5 años	104,048 €
Impresora	1.690 €	5 años	1,352 €
Dewetron	25.000 €	6 años	16,67 €
Iluminación LED	100 €	2 años	0,2 €
Acelerómetro	42€	-	-
Ordenador	800 €	7 años	17,14 €

MATERIALES	COSTE
Tubo de metacrilato (1m)	20 €
Molde de congelación	5 €
Espuma bifásica de poliuretano (aislante)	25 €

PERSONAS	PRECIO/HORA	HORAS TRABAJADAS	SUELDO DE PROYECTO
Ingeniero	42 €/hr	40	1680 €
Ingeniero	42 €/hr	40	1680 €
Jefe de proyecto	24 €/hr	150	3600 €
Técnico	34 €/hr	3	102 €

CONCEPTO	COSTE
Equipo	212,81 €
Materiales	50 €
Personas	10.062 €
Total	10.324,61
IVA (21%)	2.798,17 €
TOTAL	10.123,58 €

Para la elaboración del presupuesto se han supuesto 250 días laborables al año y jornadas de trabajo de 8 horas. Sumando las horas dedicadas a los ensayos a lo largo de los días dedicados a los mismos, se ha llegado a una jornada de trabajo completa para realizarlos.

El coste total del proyecto es de *diez mil ciento veintitrés con cincuenta y ocho euros*.